

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže



**Komparace technologií na základě získaných dat  
z topografie povrchu vytvořeného  
hydroabrazivním a laserovým dělením**

**Comparison of Technologies on the Basis of Data  
Obtained from the Surface Topography Created by  
Laser and Abrasive Waterjet Cutting**

Student:  
Vedoucí bakalářské práce:

Josef KVITA  
doc. Ing. Jan VALÍČEK, Ph.D.

Ostrava 2011

## Zadání bakalářské práce

Student: **Josef Kvita**  
Studijní program: B2341 Strojírenství  
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie  
Téma: Komparace technologií na základě získaných dat z topografie povrchu  
vytvořeného hydroabrazivním a laserovým dělením  
Comparison of Technologies on the Basis of Data Obtained from the  
Surface Topography Created by Laser and Abrasive Waterjet Cutting

Zásady pro vypracování:

1. Prostudovat základní literaturu a provést literární rešerši.
2. Studium základů technologie laserového a hydroabrazivního dělení.
3. Nastudovat způsoby měření topografie povrchu.
4. Komparace získaných dat z topografií povrchu vytvořených hydroabrazivním a laserovým dělením.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BUMBÁLEK, B.; ODVODY, V.; OŠTÁDAL, B. *Drsnost povrchu*. Praha, SNTL, 1989.
- [2] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pojmy, definice a parametry struktury povrchu*. 1997.
- [3] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1997.
- [4] MLČOCH, L.; SLIMÁK, I. *Řízení kvality a strojírenské metrologie*. Praha, SNTL, 1987.
- [5] MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*, Viena Košice, 2000, s. 275, ISBN 80-7099-430-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jan Valíček, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011



doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Místopřísežné prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 23.5. 2011 .....

.....  .....

podpis studenta

### Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011 .....

.....

podpis

Josef Kvita

Rybí 334, Rybí 742 65

**Poděkování:**

Poděkování patří vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Valíčkovi, Ph.D. za velkou trpělivost cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KVITA, Josef. *Komparace technologií na základě získaných dat z topografie povrchu vytvořeného hydroabrazivním a laserovým dělením*. Ostrava, 2011. 49 s. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní. Vedoucí práce VALÍČEK Jan.

Bakalářská práce se zabývá komparací technologií dělení hydroabrazivním a laserovým paprskem a základním rozbořem fungování hydroabrazivního a laserového dělení z hlediska topografie povrchu. Dále je proveden popis vytvořených experimentálních vzorků různých materiálů a technických parametrů dělicích zařízení a pomocí nich je provedeno vyhodnocení topografie povrchu vytvořeného těmito technologiemi. Následuje analýza, komparace a interpretace zpracovaných dat. V předmětné práci jsou také stanoveny originální korelační vztahy k technologickým parametrům.

KVITA, Josef. *Comparison of Technologies on the Basis of Data Obtained from the Surface Topography Created by Laser and Abrasive Waterjet Cutting*. Ostrava, 2011. 49 p. Bachelor's Work. VŠB – Technical University of Ostrava, Department of Machining and Assembly, Faculty of Engineering. Tutor VALÍČEK Jan.

Bachelor's work deals with the comparison of technologies abrasive waterjet and laser beam and basic analysis of functionality of abrasive waterjet and laser. Further description is made of experimental samples made of different materials and technical parameters separating device. There is an evaluation of the topography created by these technologies and the subsequent analysis, comparison and interpretation of processed data from the surface topography. In the work of question are also established correlation relationship to technological parameters.

**Obsah**

<b>Seznam použitého značení .....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam použitých symbolů .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>2 Cíl bakalářské práce .....</b>	<b>11</b>
<b>3 Metody dělení .....</b>	<b>12</b>
<b>4 Kapalinový paprsek .....</b>	<b>13</b>
4.1 <i>Současný stav AWJ.....</i>	<i>14</i>
4.2 <i>Princip AWJ.....</i>	<i>14</i>
4.3 <i>Konstrukce AWJ zařízení.....</i>	<i>15</i>
4.4 <i>Technologické parametry hydroabrazivního paprsku.....</i>	<i>17</i>
4.4.1 <i>Nezávislé technologické parametry .....</i>	<i>17</i>
4.4.2 <i>Závislé technologické parametry.....</i>	<i>18</i>
<b>5 Dělení laserovým paprskem .....</b>	<b>19</b>
5.1 <i>Plynové lasery.....</i>	<i>20</i>
5.2 <i>Současný stav.....</i>	<i>20</i>
5.3 <i>Princip laseru.....</i>	<i>21</i>
5.4 <i>Konstrukce laserového zařízení.....</i>	<i>21</i>
5.5 <i>Technické parametry dělení laserovým paprskem.....</i>	<i>23</i>
<b>6 Hodnocení topografie povrchu.....</b>	<b>24</b>
6.1 <i>Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu .....</i>	<i>27</i>
6.1.1 <i>Mechanická metoda .....</i>	<i>27</i>
6.1.2 <i>Optické metody .....</i>	<i>28</i>
6.1.3 <i>Jiné metody.....</i>	<i>28</i>
<b>7 Experimentální část .....</b>	<b>30</b>
7.1 <i>Základní informace o materiálech pro experiment .....</i>	<i>30</i>
7.2 <i>Experiment provedený technologií AWJ .....</i>	<i>31</i>
7.3 <i>Experiment provedený technologií LBM.....</i>	<i>33</i>
7.4 <i>Popis měření, použité přístroje, příslušenství.....</i>	<i>34</i>
7.5 <i>Vyhodnocení experimentu.....</i>	<i>34</i>
<b>8 Diskuze .....</b>	<b>45</b>
<b>9 Závěr.....</b>	<b>47</b>
<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>48</b>

## Seznam použitého značení

AWJ	abrazivní vodní paprsek (Abrasive Water Jet)
WJ	vodní paprsek (Water Jet)
ASJ	přímé vstřikování abrazivního paprsku (Abrasive slurry Water Jet)
WJM	čistý vodní paprsek ( Water Jet Machining )
LASER	zesilování světla pomocí stimulované emise záření (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
LBM	laserový paprsek (Laser Beam Machining)
JIT	právě v čas (Just In Time)
MFM	magnetický silový mikroskop (Magnetic Force microscopes)
RTG	radioizotopový termoelektrický generátor (Radioisotope Thermoelectric Generator)
SEM	skenovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscopes)
AFM	atomická silové mikroskop (atomic force microscopy)



## Seznam použitých symbolů

$l_p$	měřená délka	[mm]
$p$	tlak kapaliny	[MPa]
$\rho$	hustota kapaliny	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\lambda$	vlnová délka	[μm]
$P$	výkon	[W]
$A$	absorpce	[%]
$R$	reflexe	[%]
$p_o$	tlak oleje	[MPa]
$R_a$	střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
$R_z$	největší výška nerovnosti profilu	[μm]
$R_q$	střední kvadratická odchylka profilu	[μm]
$v$	rychlost dopadu kapaliny	[mm·min <sup>-1</sup> ]
$v_p$	rychlost posuvu	[mm·min <sup>-1</sup> ]
$z_p$	výška největšího výstupku v rozsahu měřené délky $l_p$	[μm]
$z_v$	hloubka nejnižší prohlubně v rozsahu měřené délky $l_p$	[μm]
$E$	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]
$A$	tažnosti	[%]
$h$	tloušťka vzorku	[mm]
$m_a$	hmotnostní tok abraziva	[g·min <sup>-1</sup> ]
$d_o$	průměr vodní dýzy	[mm]
$z$	zdvih	[mm]
$\varphi$	úhel sklonu abrazivní hlavice	[°]
$Q$	maximální průtok vody	[l·min <sup>-1</sup> ]
$f$	fokusace ohnisko	[mm]

# 1 Úvod

Vodní paprsek začíná být využíván při obrábění koncem 60. let převážně v USA. Díky kosmickému programu a používání nových materiálů vznikla potřeba vývoje nových technologií pro dělení těchto materiálů. Proto řezání vodním paprskem se rychle vyvíjelo a vývoj neustál ani v dnešní době. Ještě některé věci dokonale neznáme o této technologii, i když se hodně používá a to převážně na dělení mnoha druhů materiálů [3].

Laserový paprsek měl své začátky ještě dříve a to začátkem 50. let, kdy vznikl nový obor kvantová elektronika. První byl sestaven rubínový laser a následovaly další druhy použitých aktivních látek pro vybuzení laserového paprsku. Tento vývoj neskončil ani dnes a tvoří se velké lasery, třeba pro urychlovače částic. Laserová technologie se uplatňuje v mnoha oborech a setkáváme se s nimi na každém kroku [3].

Obě uvedené technologie mají vícero uplatnění, ale také jednu společnou, a to je dělení materiálů. Na začátku většiny výrobku je dělení materiálů z polotovaru. Jelikož každý stroj a zařízení je vyrobeno ze součástek, které představuje 40-80 % pracnosti na celém výrobku. Je velmi důležité zvolit správnou technologii, dělení polotovaru, s kterých jsou vyráběny. Momentálně pracujeme s takovými materiály, které konvenčními metodami buď vůbec nemůžeme obrábět, nebo je to velmi neefektivní. Nekonvenční technologie jsou nesdílou součástí mnoha firem, které dokážou využít přednosti těchto technologií. Ale je velmi důležité zvolit tu neoptimálnější technologii, nejen z produktivity práce, ale také s ohledem na další parametry, kterými jsou náklady na pořízení dané technologie, pracovní prostředí, náklady na provoz, likvidace odpadu spojená s obráběním, uživatelská přívětivost atd. [5].

Práce se zaměřuje na komparaci technologií na základě získaných dat z topografie povrchu vytvořeného hydroabrazivním a laserovým dělením. A to dělení různých tloušťek a materiálů s rozličnými technickými parametry hydroabrazivního a laserového paprsku.

## 2 Cíl bakalářské práce

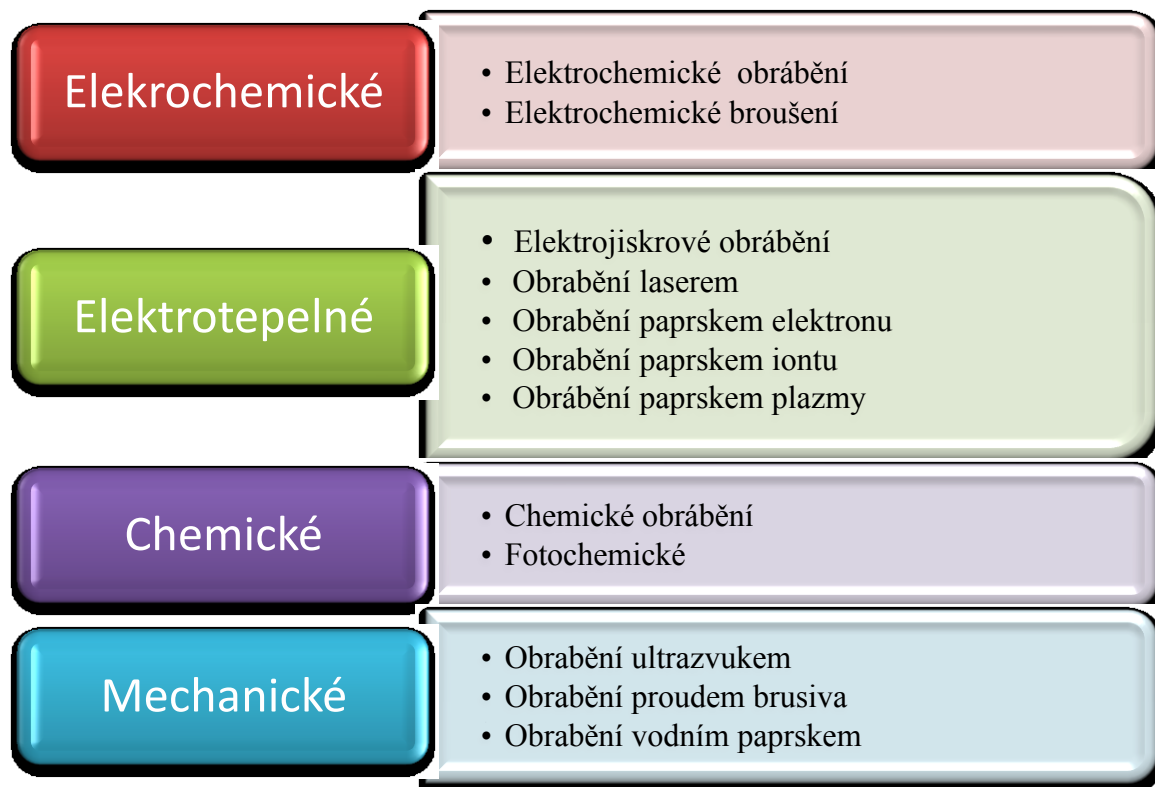
Cílem bakalářské práce je komparace technologií na základě získaných dat z topografie povrchu vytvořeného hydroabrazivním a laserovým dělením. Získané výsledky analyzovat a stanovit korelační vztahy k technologickým parametrům a navrhnout způsob určení optimálních technologických parametrů pro danou technologii.

K dosažení cíle bakalářské práce je nutno provést:

- literární rešerše o dané problematice,
- studium základu technologie laserového a hydroabrazivního dělení,
- nastudovat způsoby měření topografie povrchu,
- připravit vzorky k experimentu,
- změřit a analyzovat naměřená data.

### 3 Metody dělení

Jedno z hledisek rozdělení principu dělení materiálu je na konvenční a nekonvenční. Konvenční technologie, u některých novějších materiálů nebo složitějších výrobků už je nevhodná nebo nejde vůbec použít. Proto v dnešní době si nedokážeme představit obrábění bez nekonvenčních metod. Nekonvenční metody obrábění využívají chemické nebo fyzikální princip úběru. Na obr. 3.1 je znázorněno rozdělení do čtyř hlavních skupin, které jsou elektrochemické, elektrotepelné, chemické a mechanické procesy [3], [5], [9].



Obr. 3.1 - Schéma rozdělení nekonvenčních metod a zařazení jednotlivých technologií do hlavních skupin [3].

Laser funguje na elektrotepelném principu a, díky směrované tepelné energii na malou plochu je velmi účinný. Vodní paprsek působí na trochu větší ploše, ale o to větší mechanickou energií a vystačí se studeným řezem. Na první pohled jsou úplně jiné technologie, ale i když se to nezdá, tak fungují na podobném mechanismu oddělování materiálů. Pro dělení materiálů se nejvíc hodí hydroabrazivní paprsek (AWJ) a CO<sub>2</sub> laser. Proto budu porovnávat vzorky dělené AWJ a CO<sub>2</sub> laserem.

## 4 Kapalinový paprsek

V této kapitole jsou základní informace o této technologii. Něco málo o současném stavu, rozdělení kapalinového paprsku, konstrukce řezacího zařízení a technické parametry. Na obr. 4.1 je znázorněno rozdělení kapalinového paprsku a vyznačena cesta od kapalinového paprsku přes vodní, vysokotlaký, s příměsí abraziva, kontinuální až konečně s přísáváním abraziva, což je náš hydroabrazivní paprsek neboli AWJ.



Obr. 4.1 - Rozdělení kapalinového paprsku [5].

Mezi dva nejpoužívanější kapalinové paprsky patří:

1. WJM (Water Jet Machining) čistý vodní paprsek nebo tzv. hydrodynamické obrábění (pracovní tlak až 690 MPa) – používá se na řezání málo houževnatých a měkkých materiálů [3], [4].
2. AWJ (Abrasive Water Jet) obrábění vodním paprskem s příměsí jemného abraziva (pracovní tlak 60 až 400 MPa) – používá se na řezání houževnatých a tvrdých materiálů, které může být široký až 400 mm [3], [4]. V následujících kapitolách se analyzuje hydroabrazivní paprsek.

## 4.1 Současný stav AWJ

Je to moderní technologie 21. století. Ironií je, že řezání dřeva vodním paprskem, které Dr. Franz nejprve zkoumal je nyní jen málo využívanou technologií [10]. Nejdůležitější vlastností abrazivního paprsku jsou:

- studený řez,
- velká rychlost řezání,
- řezání součástí ve 2D i 3D,
- nepatrné deformační napětí v okolí řezu,
- řízení dráhy řezu počítačem.

Abrazivní vodní paprsek má široké uplatnění a nezanedbatelné místo v mnoha odvětvích průmyslu, např.: chemickém, potravinářském, elektrotechnickém, stavebním, sklářském, gumárenském, papírenském, metalurgickém, jaderném a zdravotnickém [10], [3].

Tlaky čerpadel se pohybují kolem 415 MPa. Při použití dvou multiplikátorů, může být až dvojnásobný. Trysky z diamantu jsou nejproduktivnější a mají životnost až 2000 hodin. Granátové abrazivo z Austrálie je nejlepší, ale také nejdražší a tvoří až 50 % hodinových nákladů. V potravinářském průmyslu není jako médium jen voda, ale také olej, mléko nebo alkohol [13].

Nejčastěji se využívá hydroabrazivní paprsek na dělení nejrůznějších materiálů, např. ocelí (legované, nerezavějící, konstrukční, tepelně zpracované, návarových s extrémní tvrdostí), litiny, hliníku, titanu a jejich slitin, mědi, niklu, sklolaminátu, kompozitů, technických plastů, mramoru, žuly, pískovce, betonu, dlažby, skla, plexiskla, elektroizolačních a tepelně izolačních kompozitů, expandovaného grafitu, podlahových krytin, kompozitu pro sportovní potřeby, kompozitní materiály s kovovou maticí a další [11], [10].

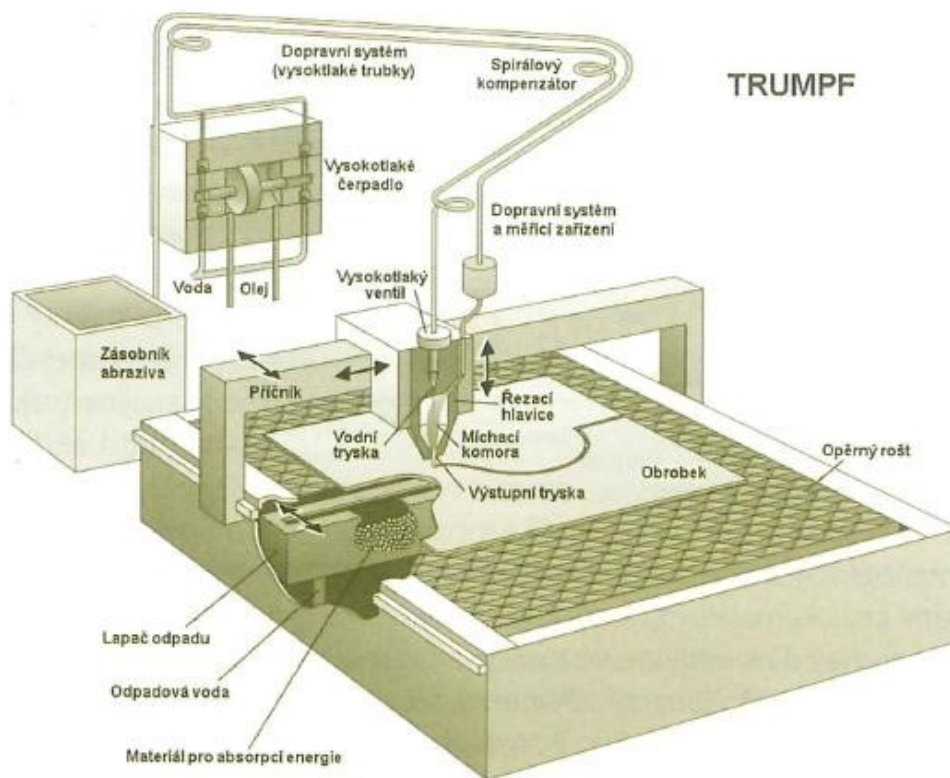
V halách a dílnách se používají na automatizovaných výroбах řezací roboti. Ve venkovních podmínkách má AWJ také své využití, různých nebezpečných prostředích. Např. ražení tunelů nebo štol, řezání nebezpečných látek [12]. Hasiči nebo jejich roboti na dálkové řízení využívají vodní paprsek, tam kde je nebezpečí výbuchu např. na řezání tlakových láhví v požáru.

## 4.2 Princip AWJ

Obrábění hydroabrazivním paprskem spočívá v generování vysokého hydrostatického tlaku (až 6000 bar) vody, který je přeměněn na kinetickou energii a míchá se s abrazivními částicemi, které tvoří nástroj (paprsek) s vysokou rychlostí (až  $1000 \text{ m.s}^{-1}$ ), který je schopen narušit požadovaný materiál. AWJ je univerzální nástroj, který nebere ohled na složení, strukturu, tvrdost nebo další fyzikální vlastnosti děleného materiálu. To umožňuje, abychom mohli dělit různé nové materiály, které nemohou být obrobena tradičními metodami bez tepelného poškození.

### 4.3 Konstrukce AWJ zařízení

Zařízení na dělení materiálu hydroabrazivním paprskem je zobrazen na obr. 4.2, kde jsou popsány důležité části. Nejdůležitější čtyři komponenty jsou čerpadlo, vodní tryska, přimíchávání abraziva a řídicí část.



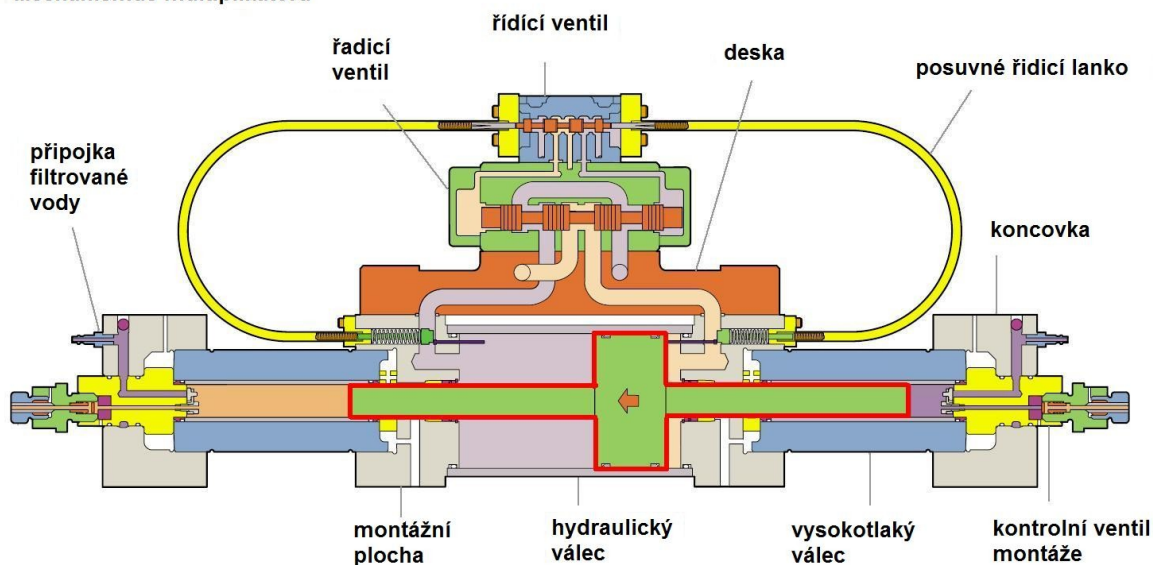
Obr. 4.2 - Zařízení na řezání vodním paprskem od firmy TRUMPF [3].

#### ➤ Čerpadlo

Čerpadlo je složeno ze dvou okruhů. Jeden je nízkotlaký olejový (5 až 35 MPa) a má velký píst, který je přímo spojen s pístem o málem průměru ve kterém je stlačována voda na tlak od 300 do 700 MPa. Poměry jsou od 1:10 až do 1:25 a závisí na ploše válců obou hydraulických okruhů. Princip se řídí podle Pascalova zákona. Pro vyšší tlak a plynulost se používá víc násobičů najednou. Dva násobiče (multiplikátory) zatěžují celou soustavu velkými silami, ale při poruše jednoho čerpadla částečně nahradí to druhé. Největší firma vyrábějící tyto čerpadla je Flow systém z USA a multiplikátor z této firmy je na obr. 4.3 znázorněn řez multiplikátoru [2], [3], [5], [13].



Mechanismus multiplikátoru



Obr. 4.3 - Schéma multiplikátoru od firmy Flow [10].

#### ➤ **Vodní tryska**

Tryska je na vstupu do řezné hlavy viz obr. 4.4. Energie kapaliny procházející tryskou se změní z potenciální na dynamickou. Množství produkovaných druhů trysek nám dovoluje zvolit mnoho energetických proudů za použití jednoho zařízení nebo využití i více trysek zapojených na jednom čerpadle. Značný vliv na životnosti trysek má pracovní tlak, materiál trysky, čistota nosného média, a to nejen mechanická, ale také chemická [1], [5].

#### ➤ **Přímíchávání abraziva**

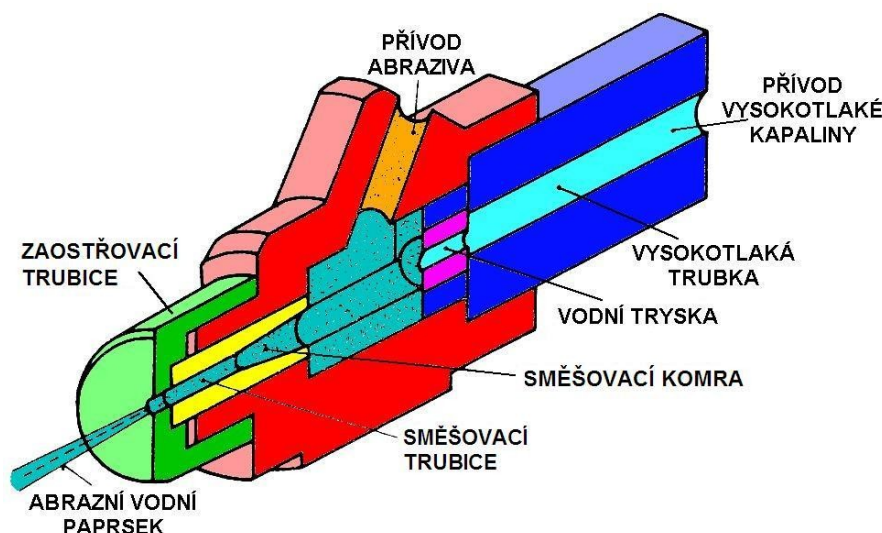
Vodní paprsek procházející řeznou hlavou, kde je směšovací komora (viz obr. 4.4) a vytváří podtlak, který strhává abrazivní částice do zaostřovací trubice. Do směšovací komory můžeme přivádět abraziva z boku nebo centrálně. Jelikož abrazivo představuje poměrně velkou část nákladů (až 50 %), je velmi důležité vybrat to správné.

##### Vlastnosti abraziva:

- *velikost* – má vliv na drsnosti a značí se v jednotkách MESH,
- *tvar zrn* – ovlivňuje kvalitu povrchu a hloubku řezu,
- *hmotnostní tok* – do určitého zvyšování hmotnostního toku se také zvyšuje hloubka dělicího řezu, po překročení hranice je to naopak,
- *tvrdost* – ovlivňuje účinnost při dělení,
- *ekologičnost* – zdravotní nezávadnost a ekologičnost odpadu,
- *cena*.

Používané abraziva jsou granát  $5\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Y}_2\text{O}_3$ , oxid hlinitý, olivín, ocelové broky nebo drť [3], [5].





Obr. 4.4 - Schematické znázornění řezné hlavy firmy SUGINO [5].

#### ➤ Řídicí část

V dnešní době jsou už i šestiosé CNC hydroabrazivní řezačky. Zařízení je řízeno z ovládacího panelu připojeným na PC. Komerční software pohlídá rychlost posuvu pro přesné řezání rohu, zaostřování paprsku pro specifické materiály a počítá i s opotřebením zaostřovací trubice [2], [3], [10].

## 4.4 Technologické parametry hydroabrazivního paprsku

Princip řezání AWJ je složitý hydrodynamický proces. Pro co nejefektivnější dělení materiálu je důležité nastavit co nejlépe všechny parametry ovlivňující dělení. Technologické parametry vodního paprsku je možno rozdělit na nezávislé a závislé.

### 4.4.1 Nezávislé technologické parametry

Nezávislé parametry jsou chápány jako vstupní technologické parametry, které mají vliv na proces dělení.

#### ➤ Hydraulické parametry

- *tlak pracovní kapaliny* – nejdůležitější technologický parametr,
- *průměr vodního paprsku* – má vliv na kvalitu řezné plochy a hloubku řezu,
- *materiál abraziva* – dělicí proces materiálu výrazně ovlivňuje hustota, tvrdost a pevnost abrazivního paprsku. Rozdělení:
  - těžké – např. granát ( $\rho = 4 \text{ g.m}^{-3}$ ), ocelové piliny ( $\rho = 8 \text{ g.m}^{-3}$ ),
  - lehké – např. měděné piliny ( $\rho = 1,5 \text{ g.m}^{-3}$ ).

#### ➤ Parametry abraziva (materiál abraziva, tvar a rozměry abraziva, hmotní tok abraziva)

#### ➤ Parametry míšení (metoda míšení, stav abraziva, rozměry směšovací komory, rozměry a tvar abrazivní směšovací komory)

- **Parametry řezání** (řezná rychlost, vzdálenost trysky od materiálů, počet přechodů paprsku po stejné řezné dráze, úhel dopadu paprsku na materiál, obráběný materiál) [3].

#### 4.4.2 Závislé technologické parametry

Jsou to parametry, které nám vzniknou po procesu na děleném materiálu. Zařadit zde můžeme:

- **hloubku řezu** - hloubka řezu je dána maximální hloubkou řezu, do které je schopný abrazivní paprsek proniknout při obrábění,
- **šířka řezné drážky**,
- **kvalita řezné plochy** - pod pojmem kvalita řezné plochy se chápe zejména drsnost obrobené a sklon řezné plochy, zpevnění materiálu a výška nerovností povrchu [3].

## 5 Dělení laserovým paprskem

Laser je anglická zkratka pro Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což česky znamená: zesilování světla pomocí stimulované emise záření. Nebo další používaná zkratka je LBM, také z anglického Laser Beam Machinig [16].

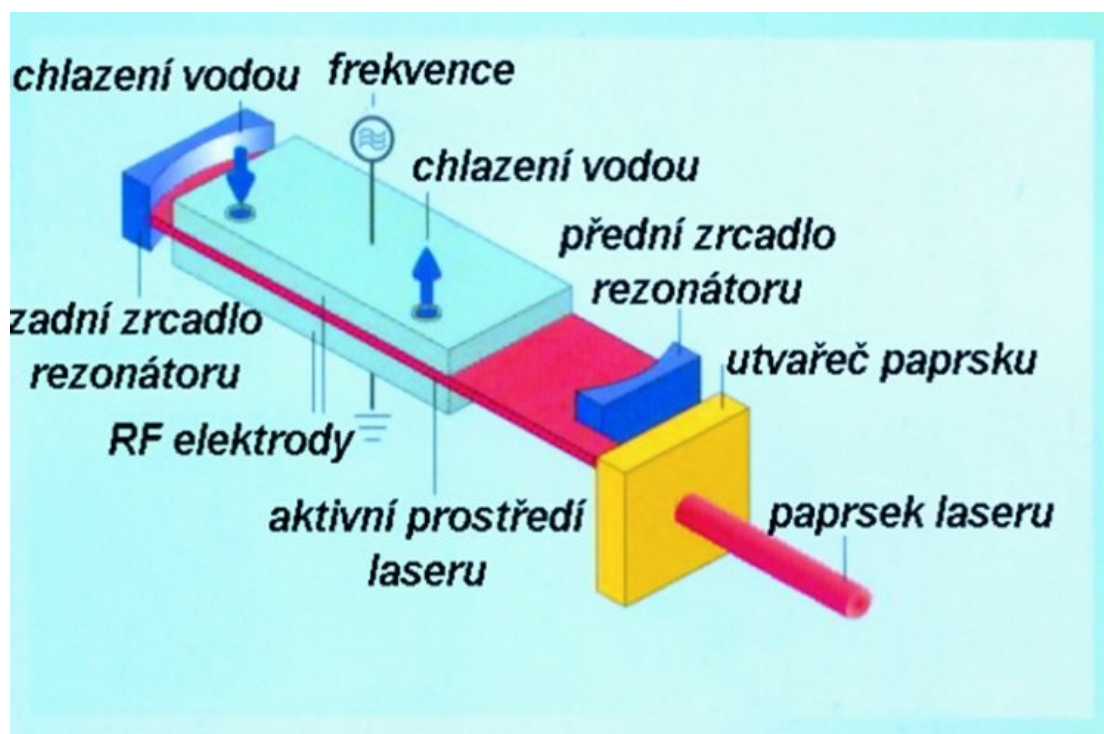
Laserový paprsek se rozděluje do čtyř skupin, základní informace a oblasti použití jsou uvedeny v následující tabulce 5.1.

Tab. 5.1 - Rozdělení laseru se základními parametry a použitím [3].

Druh laseru	Aktivní látka		Vlnová délka [μm]	Typ paprsku	Výkon laseru	Oblast aplikace
Pevný	Rubín	Nd <sup>3+</sup>	0,6943	pulzní	5 W	holografie
	Nd-YAG	Nd <sup>3+</sup>	1,064	kontinuální pulzní	100 až 1200W	strojírenský průmysl
	Nd-sklo		1,064	pulzní	2mW	
	alexandrit		0,7-0,818	pulzní	10W	
Polovodičový	GaAs		0,80-0,90	pulzní	2 až 10 mW	informační technologie, optoelektronika
Plynový	CO <sub>2</sub> (N <sub>2</sub> <sup>+</sup> He)	CO <sub>2</sub>	10,6	kontinuální nebo pulzní	500 až 15 000 W	strojírenský průmysl
	He-Ne	Ne	0,6328; 1,15; 3,39	kontinuální	20mW	metrologie, geodzie, holografie
	Ar	Ar <sup>+</sup>	0,4764; 0,488; 0,5145	kontinuální nebo pulzní	1 až 5 000W	laserová chirurgie
	Excimer (ArCl)		0,17	pulzní	20W až 250W	fotolitografi, laserová chirurgie, strojírenství
	(XeCl)		0,308			
	(XeF)		0,351			
	(KrF)		0,248			
Kapalinový	barvivo Rhodamin e 6	etalon, metanol	0,34 – 1,175	pulzní	100W	fotochemie, spektrografie

## 5.1 Plynové lasery

Patří zde helium-neonový laser, měděný laser, jódový laser, argonový laser, helium-kadmiový laser, vodíkový laser, dusíkový laser, excimerové lasery a CO<sub>2</sub> lasery. V technologii dělení materiálů se používají především CO<sub>2</sub> lasery (obr. 5.1) [17]. CO<sub>2</sub> lasery vyzařují infračervené laserové záření o vlnové délce 10,6  $\mu\text{m}$  a vlastní celkové účinnosti cca 10 – 13 %. Aktivní látky v CO<sub>2</sub> laser je směs CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> a He plynů. Stimulace aktivní látky (média) je dosaženo elektrickým výbojem v plynu [18]. Pracuje v kontinuálním i pulzním režimu.



Obr. 5.1 - Princip CO<sub>2</sub> laseru [17].

## 5.2 Současný stav

Základní kámen kvantové fyziky položil roku 1917 Albert Einstein, když se vyjádřil o vyzařování světla z atomu vynuceným způsobem. V roce 1958 vymysleli pánové C. H. Towns a A. L. Shawlow první laser. Dva roky na to T. H. Maiman postavil a ukázal první rubínový laser. Postupem času byly představovány lasery s použitím jiných aktivních látek např. kapalinové, pevné a plynné aktivní látky. A v roce 1964 C. H. Patel prováděl experimenty s plynovým CO<sub>2</sub> laserem [3].

Přednosti dělení laserovým paprskem jsou:

- velká koncentrace energie na malou plochu,
- nenáročná regulace výkonu a ovladatelnost laseru,
- nenastává opotřebení nástroje,
- CNC řízení a ničím neomezený pohyb,
- úzký řez [3], [4].

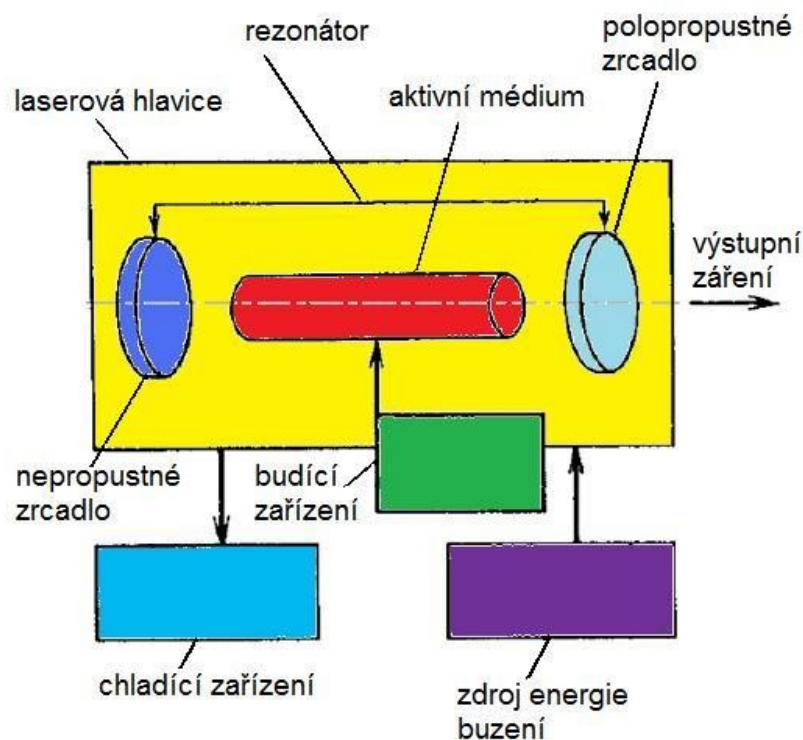
Od začátku používání laseru se uplatnil v mnoha oblastech. Dnes přístroje s využitím laseru jsou v technologii, medicíně, energetice, metrologii, geodézii, biologii, spektroskopii, ve vojenské technice, ve výpočetní technice, chemii, v technice spojů, v automatizaci a dálkovém řízení. Obrábění používá laser k dělení materiálů, vrtání, popisování součástí, svařování a pájení, tepelnému zpracování, nanášení ochranných a oteruvzdorných, nátěrů gravírování, soustružení a frézování. Každý obor má své zvláštnosti, pak i různé druhy a specifickou aplikaci laseru [3], [6], [4], [17].

### 5.3 Princip laseru

Kvantová fyzika a planetární modul atomu vysvětluje princip fungování laseru. Laserový paprsek vzniká umělou stimulací elektromagnetického záření místo spontánní emise. Samovolné emisní záření vzniká, když atomy s energetickou hladinou  $E_2$  mají tendenci zaujímat hladinu s nižší energií  $E_1$  a přitom emitují kvantum světelného záření. Laser je tedy kvantově elektronický zesilovač a generátor světelných vln. Normální světelné záření je vlnité a šíří se všemi směry. Laserový paprsek je monochromatický, koherentní a málo rozbíhavý. Vysoká hustota energie paprsku, která je soustředěná na malou plochu, což má za následek na ploše menší než  $\text{mm}^2$  v necelé vteřině natavení a odpaření materiálu [3], [18].

### 5.4 Konstrukce laserového zařízení

Základní konstrukce každého typu laseru je znázorněna na schematickém obr. 5.2 a skládá se z laserové hlavice, budicího a chladicího zařízení.



Obr. 5.2 - Schéma laseru [6].

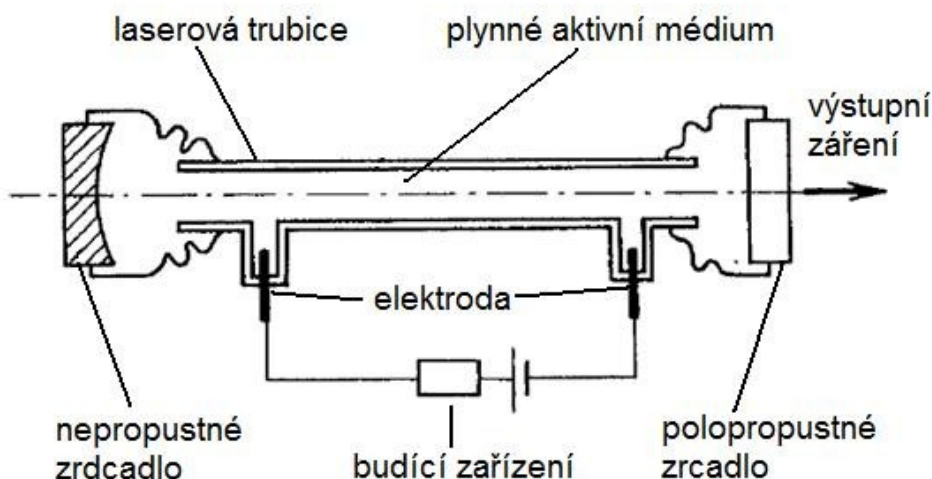
➤ **Laserová hlavice**

Laserová hlavice se skládá ze dvou částí, laserového media a rezonátoru.

- a) **Aktivní medium** – může být plynné, pevné, tekuté a určuje délku vlny. Směs materiálu s vhodnými energetickými hladinami, které jsou průhledné a je schopno odvádět vzniklé teplo.
- b) **Rezonátor** – je to optický zesilovač, který formuje a zesiluje záření. Rezonátor se skládá z nepropustného a polopropustného zrcadla (obr. 5.2) a nejpoužívanější jsou sférické.

➤ **Budící zařízení**

Působí na pracovní režim laseru. Je buzeno elektrickým výbojem, elektronovým paprskem, výbojkou, chemické reakce a záleží na použitém aktivním mediu. Schematicky buzení elektrickým výbojem je na obr. 5.3.



Obr. 5.3 - Buzení elektrickým výbojem [6].

➤ **Energetický zdroj buzení** - zvláštní druh síťového napájení

➤ **Chladicí zařízení**

Zajišťuje zpracování přebytečného tepla, které se chladí ve dvou okruzích. Ve vnitřním se používá ionizovaná voda a vnějším je pitná voda. Speciální chladiče s vnějším okruhem jsou chlazeny vzduchem [6].

## 5.5 Technické parametry dělení laserovým paprskem

Pro dělení je možno laser považovat za víceúčelový nástroj. Nejpoužívanější lasery v tomto oboru jsou kontinuální CO<sub>2</sub> lasery se středním výkonem do 15 kW, kterými je možné dělit konstrukční ocel do tloušťky až 20 mm, korozivzdorné oceli do tloušťky 10 mm a slitiny hliníku do tloušťky 5 mm [6].

Technické vlastnosti jsou pro dělení laserem důležité a ovlivňují obrobitelnost materiálu. Obrobitelnost je dána těmito vlastnostmi:

- **absorpce**,  $A$  [%] vlastnost materiálu pohlcovat světelnou energii a měnit ji na kinetickou,
- **tepelná vodivost**, klasifikována součinitelem tepelné vodivosti,
- **reflexe** (odrazivost)  $R$  [%] je to poměr množství dopadlé a odražené energie, při zvyšování vlnové délky laserového paprsku stoupá také odrazivost kovu,
- **tavení povrchové vrstvy**,
- **odpařování**.

Při dopadu paprsku se část odrazí, část absorbuje a poslední část projde materiálem. Absorbovaná energie nahřeje, nataví materiál a nakonec se odpaří. Čím větší je absorpce materiálu a čím je menší tepelná vodivost a odrazivost povrchu obráběné plochy, tím je lepší obrobitelnost materiálu [3], [6].

Dělit materiál můžeme třemi způsoby:

- **sublimační** – vlivem velké teploty na malé ploše se materiál převážně odpaří,
- **tavné** – v místě dělení je materiál nataven laserovým paprskem a asistenčním plynem odfukován z místa řezu,
- **pálením** – materiál je zahřátý na zápalnou teplotu a přiváděný reaktivní plyn se spálí v exotermické reakci, asistenční plyn odstraní vzniklou strusku [3], [6], [17].

Základní charakteristiky dělení:

- **rychlost řezání** - závisí na způsobu dělení, výstupním výkonu paprsku laseru, požadované kvalitě řezu, tloušťce a druhu řezaného materiálu,
- **kvalita řezu** - je kvalita dělené plochy a šířka tepelně ovlivněné zóny,
- **šířka řezné spáry** - je daná druhem laseru, typem a tloušťkou děleného materiálu [6], [4].

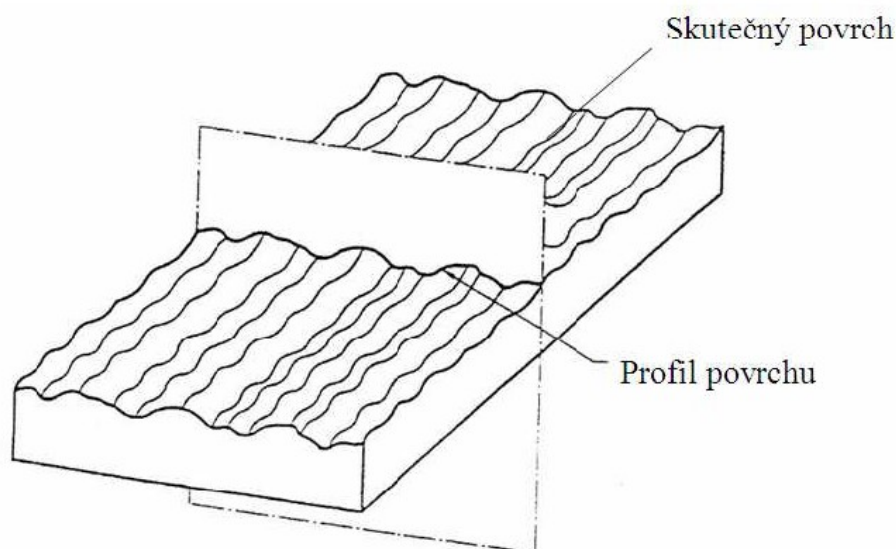


## 6 Hodnocení topografie povrchu

Vazba mezi funkcí a jakostí povrchu plochy, která je vyrobena danou technologií, je možno hodnotit ze dvou pohledů. První je textura (prostorové uspořádání) povrchu, které je formulováno hlavně jeho drsností. Druhé hledisko je fyzikální a chemické vlastnosti povrchové vrstvy součásti. Jejich funkce ovlivněná výrobou je známá pod pojmem integrita povrchu. K integritě povrchu řadíme podmínky vzniku povrchu, účinky technologických metod a vlastnosti vytvořeného povrchu [14].

Většinou se používá jednoduchá metoda profilu v rovině řezu znázorněné na obr. 6.1 a stanovené dvěma normami:

- ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu [20].
- ČSN EN ISO 4288: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu [21].



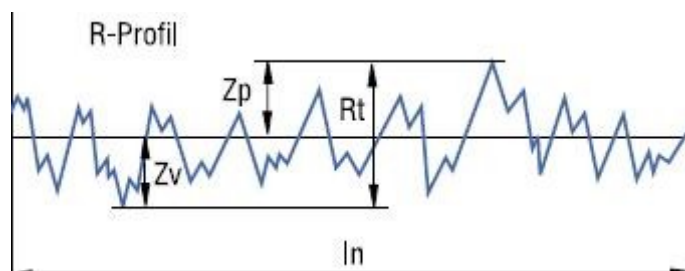
Obr. 6.1 - Profil povrchu [20].

Měřením získáme 2D profil jako obraz povrchu součásti. Z nefiltrovaného profilu P získáme po použití filtrů profil drsnosti R a profil vlnitosti W [22]. Profil P je schematicky znázorněn na obr. 6.2. Profil R je filtrován, aby potlačil vlnitost a mohl se použít pro vyhodnocování drsnosti povrchu viz obr. 6.3 [22]. Profil W je filtrován, aby drsnosti povrchu zanedbal, ale vyzvedl vlnitost povrchu viz obr. 6.4 [22].

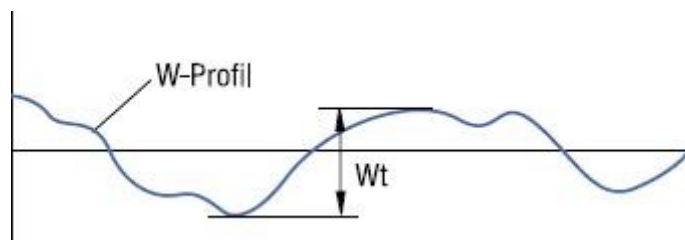


Obr. 6.2 - P – Profil (nefiltrovaný profil) povrchu [22].





Obr. 6.3 - R – Profil (profil drsnosti) povrchu [22]



Obr. 6.4 - W – Profil (profil vlnitosti) povrchu [22]

Mezi nejpoužívanější normované parametry hodnocení drsnosti povrchu patří:

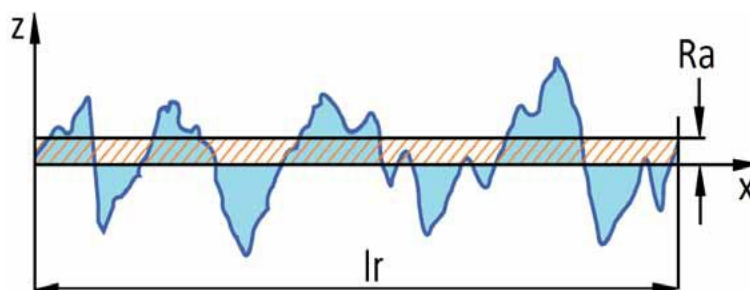
➤ ***Střední aritmetická odchylka profilu  $R_a$***

Aritmetický střed absolutních odchylek filtrovaného profilu drsnosti od střední čáry základní délky  $l_r$  viz obr. 6.5. Vypovídací schopnost parametru je nízká,  $R_a$  nereaguje citlivě na extrémní výšky hrotů profilu a hloubky rýh profilu [22], [5].

$$R_a = \frac{1}{l_p} \int_0^{l_p} |y(x)| dx$$

kde je:  $l_p$  - měřená délka [m],

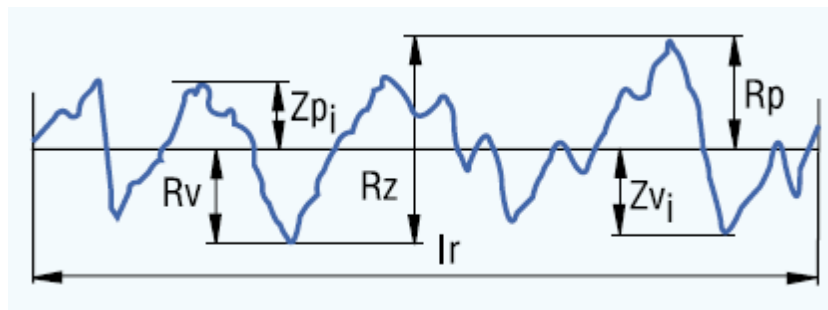
$y(x)$  - funkce popisující profil [1].

Obr. 6.5 - Střední aritmetická odchylka profilu  $R_a$

➤ **Největší výška nerovnosti profilu  $R_z$**

Součet výšky nejvyššího výstupku  $R_p$  a hloubky nejnižší rýhy  $R_v$  uvnitř základní délky  $l_r$  viz obr. 6.6 [22].

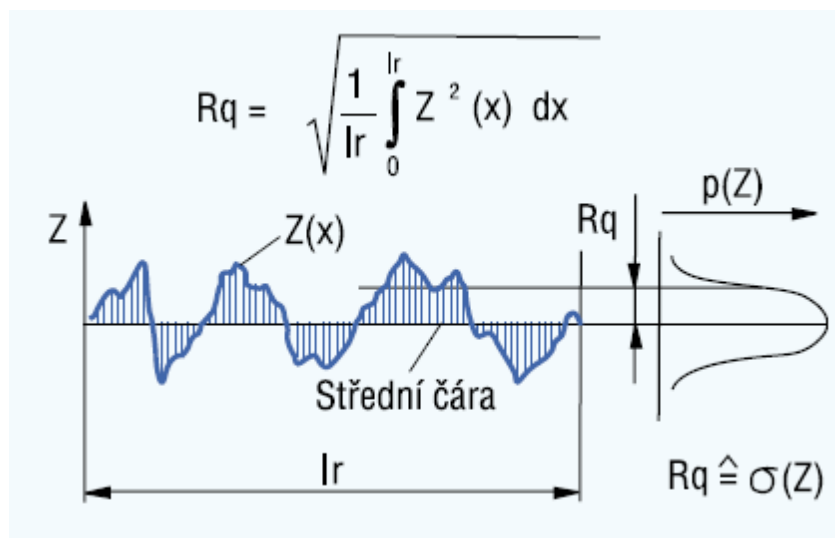
$$R_z = Z_p + Z_v$$



Obr. 6.6 - Největší výškový profil  $R_z$

➤ **Střední kvadratická odchylka profilu  $R_q$**

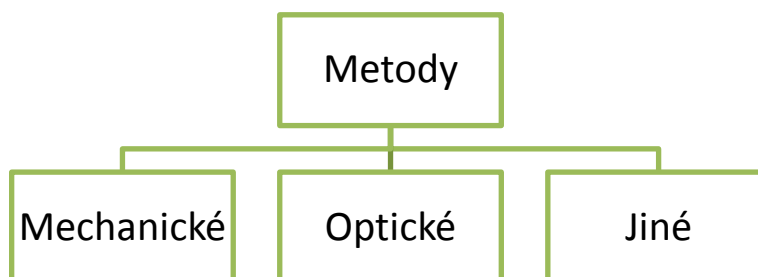
Parametr  $R_q$  má význam při statistickém pozorování profilu povrchu, neboť  $R_q$  zároveň odpovídá standardní odchylce z profilových souřadnic viz obr. 6.7 [22].



Obr. 6.7 - Střední kvadratická odchylka profilu  $R_q$  se vzorce pro jeho vypočítání [22]

## 6.1 Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu

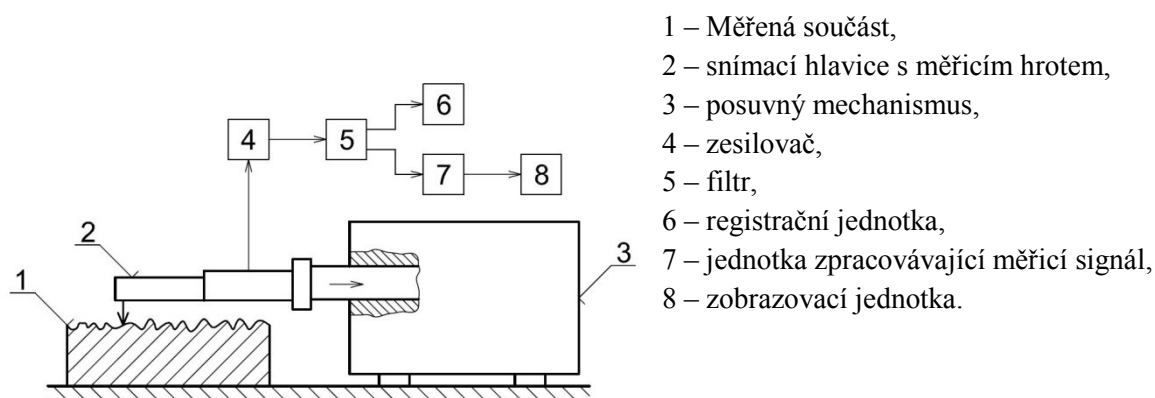
Je mnoho měřicích metod a přístrojů na zjišťování drsnosti povrchu. Nám dostatečným způsobem stačí rozdělení na tři základní skupiny, které jsou mechanické, optické a jiné viz schéma na obr. 6.8.



Obr. 6.8 - Rozdělení metod pro hodnocení topografie povrchu [5]

### 6.1.1 Mechanická metoda

Dotyková metoda je doposud nejpoužívanější metodou, hlavně ve strojírenství. Výhodou mechanických metod je přímé měření a schopnost použití pro všechny druhy povrchů a u většiny také změřit opakovaně a identicky. Topografie povrchu je zaznamenávána analogicky, ale jde ji převést do digitální podoby. Hrot snímače, který způsobuje elastické a plastické deformace, nám může poškodit měřený povrch. Na obr. 6.9 je uvedeno schéma dotykového profilometru [5].

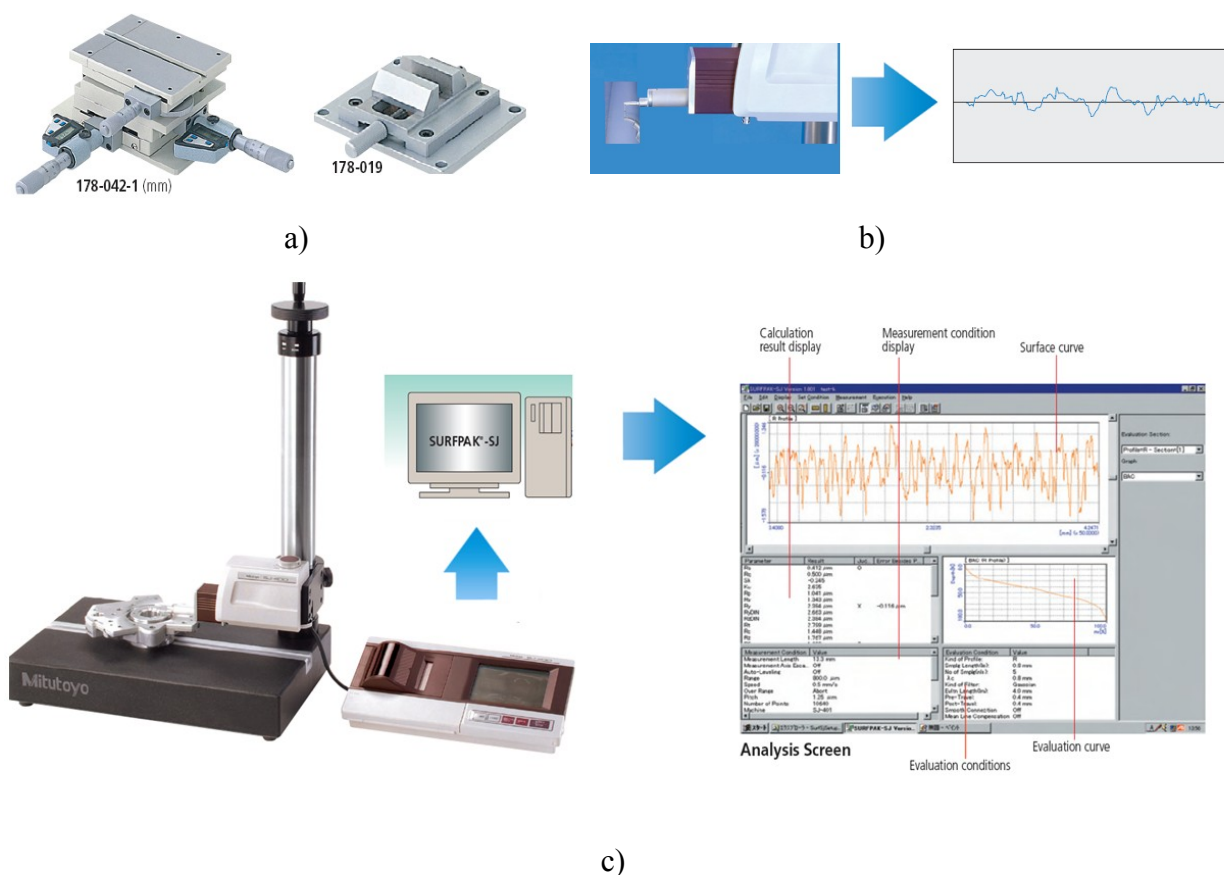


Obr. 6.9 - Schematické znázornění principu kontaktního profilometru [5]

### *Kontaktní měřicí přístroj s přímým způsobem měření*

Profiloměr SURFTEST SJ401 (obr. 6.10c). Při měření je pracovní hrot v kontaktu s měřeným povrchem (obr. 6.10b). Vzorky se upínají do měřicího svěráku, který je součástí posuvného X-Y (obr. 6.10a) stolu umístěného na granitové desce měřicího stroje. Měřicí hlava s posuvným hrotem je uchycena na sloupkovém vedení umožňující posuv

v ose Z. Měřicí hrot se pohybuje ve směru osy X v rozsahu max. do 25 mm snímané délky. Nerovnost povrchu způsobuje výchylku hrotu, kde je získáván základní signál, který je nositelem informace o snímaném povrchu. Signál je následně zpracován prostřednictvím PC v programu SURFPAK (obr. 6.10c). Vzorek je proměřován v ekvidistantních krocích, aby bylo možné určit informace o změně nerovnosti v různých úrovních hloubky měřeného vzorku.



Obr. 6.10 - Princip měření na přístroji SURFTEST SJ 401.

### 6.1.2 Optické metody

Dalším způsobem měření topografie povrchu jsou optické metody. Je to bezdotykové měření, které nám zaručuje nezneškodnění měřeného povrchu. Metoda je založena na odrazu nebo rozptylu světelného paprsku. Interakce mezi světelným svazkem a povrchem závisí na vlnové délce světla, drsnosti a na materiálových vlastnostech měřeného vzorku. Data získaná optickými metodami je nutno porovnat s daty získanými kontaktním profilometrem [5].

### 6.1.3 Jiné metody

Existuje celá řada metod měření charakteristik topografie povrchu, které pracují na jiném principu než na mechanickém nebo optickém.

Zde je uveden krátký výčet některých nejznámějších metod:

- **měření nerovnosti povrchu proudem stlačeného vzduchu** - energetická ztráta výstupního proudu po interakci s měřeným povrchem vzduchu určuje stupeň nerovnosti povrchu,
- **RTG difrakční metoda** - využívá strukturních vlastností materiálu po působení rentgenová záření, jehož vlnová délka je přibližně stejná jako meziatomová vzdálenost v krystalové mřížce,
- **elektronová difrakce** - zjišťuje strukturu povrchu kovových materiálů,
- **neutronová difrakce** - zjišťuje strukturu magnetických a lehkých prvků,
- **SEM (scanning electron microscopy)** - je založena na analýze proudu elektronů odražených povrchem a kalibraci na parametry topografie povrchu,
- **STM a AFM (scanning tunnelling microscopy and atomic force microscopy)** stanovují difference ve vlastnostech tunelového efektu (STM) a v charakteru meziatomárních sil (AFM) vlivem nerovnosti povrchu,
- **MFM (magnetic force microscopy)** umožňuje na základě zmagnetování studovaného vzorku snímat jeho magnetické projevy a jejich analýzou určit funkční vztahy popisující topografii povrchu.

K získání komplexní charakterizace topografie povrchu se výše uvedené metody aplikují často společně, protože jejich výsledky se vzájemně doplňují [5].

## 7 Experimentální část

V experimentální části je provedena analýza kvality povrchu zkušebních vzorků vytvořených laserovým a hydroabrazivním dělením za účelem porovnání výškových parametrů nerovnosti povrchu v závislosti na změně technologických parametrů procesu řezání. Cílem těchto prováděných experimentů je hledání a definování společných vazeb, na základě kterých může být provedena optimalizace řezných procesů. Měření nerovnosti povrchu bylo provedeno v laboratoři IF VŠB – TU Ostrava na kontaktním profilometru SURFTEST SJ 401.

### 7.1 Základní informace o materiálech pro experiment

Vstupními materiály pro provedení experimentů byly tři. První je nelegovaný titan dodaný v žíhaném stavu ve formě plátových desek rozměru 10 x 2000 x 3000 mm s označením ASTM B265-99. Chemické a mechanické vlastnosti titanu jsou uvedeny v tab. 7.1. Druhý materiál je nelegovaná konstrukční, jakostní ocel S235JR (1.0038) dle EN 10025-2 viz tab. 7.2. Posledním materiálem na vzorky je austenitická, svařitelná, nestabilizovaná, korozivzdorná ocel ČSN 17 240 viz 7.3.

Tab. 7.1 - Chemické a mechanické vlastnosti materiálu ASTM B265-99.

Chemické složení	Fe	C	N	O	H
Min [%]	0.13	0.01	0.01	0.11	0.002
Max [%]	0.12	0.01	0.01	0.14	0.002
Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti v tahu		Mez kluzu 0,2[%]		Tažnost
Min - Max [MPa]	345		275-455		20 [%]

Tab. 7.2 - Chemické a mechanické vlastnosti materiálu S235JR (1.0038) dle EN 10025-2.

Chemické složení	C	N	Mn	P	S
Max [%]	0.17	0.12	1.04	0.035	0.035
Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti v tahu		Mez kluzu 0,2		Tažnost
Min - Max [MPa]	360-510		225		26 [%]

Tab. 7.3 - Chemické a mechanické vlastnosti materiálu ČSN 17 240.

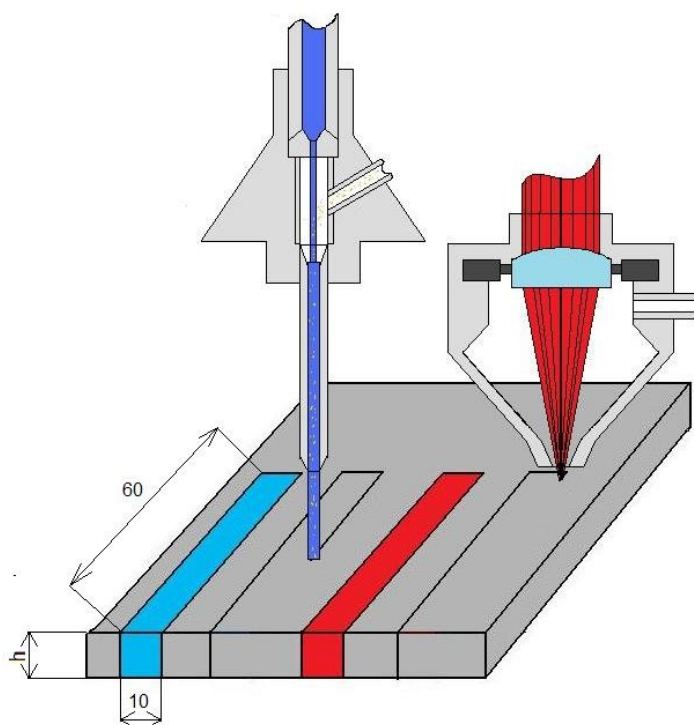
Chemické složení	C	Cr	Ni	P	S
Max [%]	0.07	17	9	-	-
Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti v tahu		Mez kluzu 0,2		Tažnost
Min - Max [MPa]	540-750		230		45 [%]

## 7.2 Experiment provedený technologií AWJ

Předmětem měření byly 6 zkušebních vzorků a to 3 z titanu o mechanických a chemických vlastnostech (Tab. 7.1) a další 3 z oceli (Tab. 7.2, 7.3), vytvořených hydroabrazivním dělením na výrobním zařízení firmy PTV - CNC stůl WJ2020B-1Z-D, čerpadlo PTV-37-60 Pump na pracovišti Ústavu geoniky AV ČR, v. v. i Ostrava (Obr. 7.1). Na schematickém obr. 7.2 je znázorněno dělení vzorku. Hlavním cílem experimentu je porovnat kvalitu vytvořených ploch při změně technologických parametrů. Vzorky byly nařezány za následujících technologických parametrů tab. 7.4.



Obr. 7.1 - Hydroabrazivní technologie dělení - řezací stůl CNC WJ2020B-1Z-D výrobce firma PTV s.r.o.



Obr. 7.2 - Schematický plán přípravy vzorků hydroabrazivním a laserovým paprskem.

Tab. 7.4 - Tabulka technologických parametrů dělení hydroabrazivním paprskem

Parametry řezání	Vzorek č.1	Vzorek č.2	Vzorek č.3	Vzorek č.4	Vzorek č.5	Vzorek č.6
Tloušťka $h$ [mm]	20	20	15	10	10	10
Rychlost [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	100	150	200	450	500	550
Tlak $p$ [MPa]	300	300	300	400	400	400
Hmotnostní tok abraziva $m_a$ [ $\text{g} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	300	300	300	400	400	400
Vodní dýza $d_o$ [mm]	0,33	0,33	0,33	0,3	0,3	0,3
Zaostřovací trubice $d_f$ [mm]	1,02	1,02	1,02	0,8	0,8	0,8
Délka zaostřovací trubice $l_f$ [mm]	76	76	76	76	76	76
Zdvih $z$ [mm]	5	5	5	3	3	3
Počet přechodů	1	1	1	1	1	1
Úhel sklonu abrazivní hlavice $\varphi$ [°]	90	90	90	90	90	90
MESH	80	80	80	80	80	80
Typ násobiče	PTV-37-60 PUMP	PTV-37-60 PUMP	PTV-37-60 PUMP	PTV-37-60 PUMP	PTV-37-60 PUMP	PTV-37-60 PUMP
Typ násobiče	Dvoj činný	Dvoj činný	Dvoj činný	Dvoj činný	Dvoj činný	Dvoj činný
Výkon [kW]	37	37	37	37	37	37
Tlak oleje [MPa]	20	20	20	20	20	20
Maximální tlak [MPa]	415	415	415	415	415	415
Maximální průtok vody [ $\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	3,68	3,68	3,68	3,68	3,68	3,68



## 7.3 Experiment provedený technologií LBM

Předmětem měření byly 3 zkušební vzorky titanu o rozměrech 40 x 12 x 10 mm a zbylé 3 vzorky jsou z nelegované oceli o různých tloušťkách, které mají vypsane mechanické a chemické vlastnosti v tab. 7.1 a 7.2. Vzorky byly vytvořeny laserovým dělením na výrobním zařízení CNC 2D laser Prima Industrie, typ PLATINO 2040 / CP3500 ve firmě METAKOV s.r.o., Slovenská republika viz obr. 7.3. Hlavním cílem experimentu je porovnat kvalitu vytvořených ploch při změně technologických parametrů. Vzorky byly nařezány za následujících technologických parametrů tab. 7.5.



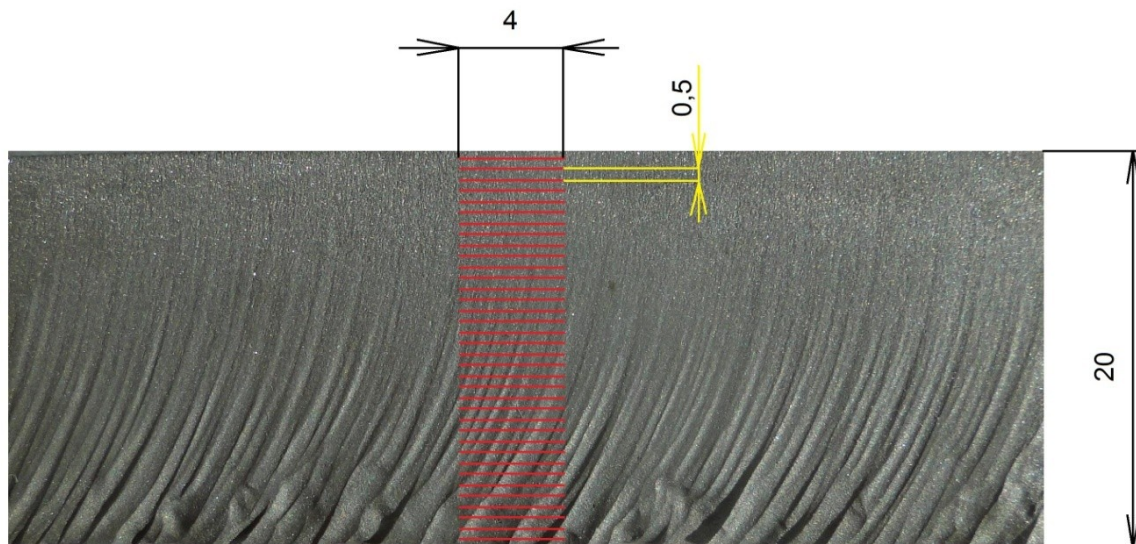
Obr 7.3 - Technologie CO<sub>2</sub> laserového dělení – řezací stůl 2D CNC PLATINO 2040 /3500 CP

Tab. 7.5 - Tabulka technologických parametrů dělení CO<sub>2</sub> laserem

Parametry řezání	Vzorek č.7	Vzorek č.8	Vzorek č.9	Vzorek č.10	Vzorek č.11	Vzorek č.12
Tloušťka h [mm]	20	15	20	12	12	12
Čočka [palce]	9	9	9			
Posunová rychlost $v_p$ [mm.min <sup>-1</sup> ]	830	340	350	350	450	550
Výkon P [W]	4600	5000	4900	3500	3500	3500
Laser mód	$f=1000\text{HZ}$	CW	CW	0	0	0
Přídavný plyn	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Tlak [bar]	0,6	20	20	17	17	18
Standing distance z	1,2 mm	0,6 mm $t=1000\text{ms}$	0,8 mm $t=1000\text{ms}$	$t=800\text{ms}$	$t=500\text{ms}$	$t=500\text{ms}$
Fokusace ohnisko [mm]	6	-16,2	-16	-12	-8	-8
Kompenzace řezné stěny [mm]	0,1	0,3	0,3	-	-	-
Průměr dýzy [mm]	2,5	3	3	-	-	-

## 7.4 Popis měření, použité přístroje, příslušenství

Měření nerovnosti povrchu bylo provedeno v laboratoři IF VŠB – TU Ostrava na kontaktním profilometru SURFTEST SJ 401. Přístroj a příslušenství je popsáno v kapitole 6.1.1 mechanické metody a podnadpisu kontaktní měřicí přístroj s přímým způsobem měření. Jak jde vidět na obr. 7.4, vyhodnocovací délka je 4 mm, skládající se z 5 základní délek o rozměru 0,8 mm. Krok měřených linií je 0,5 mm. Druh použitého filtru je Gauss.



Obr. 7.4 - Schematicky naznačené linie měření na vzorku.

## 7.5 Vyhodnocení experimentu

Pro vyhodnocení budu porovnávat různé materiály dělené AWJ a laserem. Rozdělil jsem je na dvě části. První část, kde je porovnáváno 6 vzorků z oceli. Každou technologií jsou děleny tři vzorky. V tab. 7.6 jsou vlastnosti vzorku, druh a tloušťka materiálu, řezná rychlost a fotky plochy po dělení. V tab. 7.7 jsou očíslované vzorky dělené těmito technologiemi s rychlostmi posuvu a rovnicemi regresních křivek závislosti:

- maximální výšky profilu  $R_z$  na hloubce řezu  $h$  viz obr. 7.5,
- střední aritmetické odchylce  $R_a$  na hloubce řezu  $h$  viz obr. 7.6,
- střední kvadratické odchylce  $R_q$  na hloubce řezu  $h$  viz obr. 7.7, a spolehlivost regresních křivek  $R^2$ .

Druhá část se liší jen děleným materiálem, který je titan. V tab. 7.8 jsou vlastnosti vzorku, druh a tloušťka materiálu, řezná rychlost a fotky plochy po dělení. V tab. 7.9 jsou očíslované vzorky dělené oběma technologiemi s rychlostmi posuvu a rovnicemi regresních křivek závislosti:


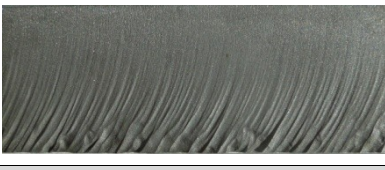
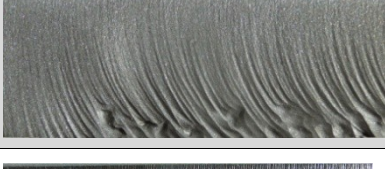
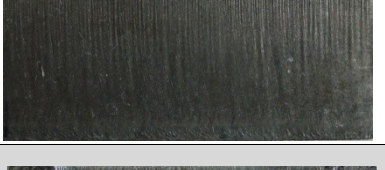
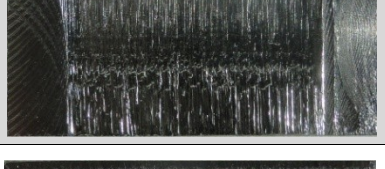

- maximální výšky profilu  $R_z$  na hloubce řezu  $h$  viz obr. 7.8,
- střední aritmetické odchylce  $R_a$  na hloubce řezu  $h$  viz obr. 7.9,

- střední kvadratické odchylce  $Rq$  na hloubce řezu  $h$  viz obr. 7.10, a spolehlivost  $R^2$ .

Na obr. 7.6 je porovnání dělených vzorků AWJ a CO<sub>2</sub> laserem, ale z odlišných materiálů. Materiálové vlastnosti a tloušťky jsou v předchozích tabulkách viz tab. 7.1, 7.2 a 7.3. Trendy jsou většinou rostoucí až na vzorek číslo 7., který je řezaný laserem. Tento vzorek má nízkou maximální výchylku povrchu  $Rz$ , přičemž s hloubkou klesá drsnost při posuvové rychlosti 830 mm.min<sup>-1</sup>. Vysvětlují si to tím, že po řezání zůstala na vzorku vrstvička, která znehodnotila měření, a klasická struktura zůstala pod ním, můžeme to vidět v tab. 7.6 na fotografii povrchu.

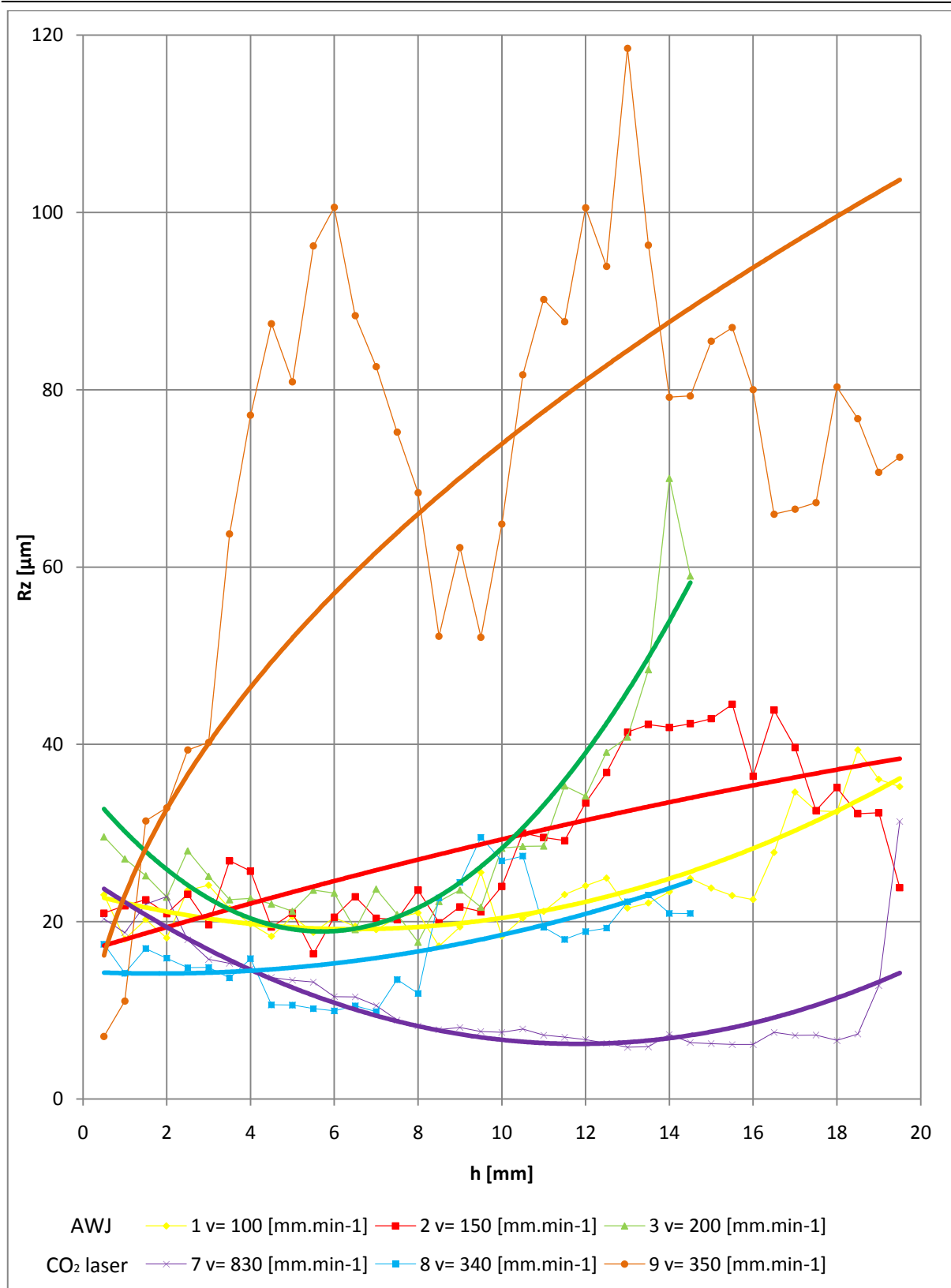
Na obr. 7.8 můžeme vidět dělení stejného materiálů s podobnými a stejnými řeznými rychlostmi jak hydroabrazivním, tak laserovým paprskem. Jde dobře od sebe rozeznat obě technologie. Laserové dělení má o hodně větší drsnosti skrz  $Rz$ ,  $Ra$  i  $Rq$  viz obr. (7.8, 7.9, 7.10) a to můžeme také vidět, že AWJ má drsnosti konstantní i vzhledem k použitým řezným rychlostem se moc neliší.

Tab. 7.6 - Informační tabulka s fotkami vytvořených řezu

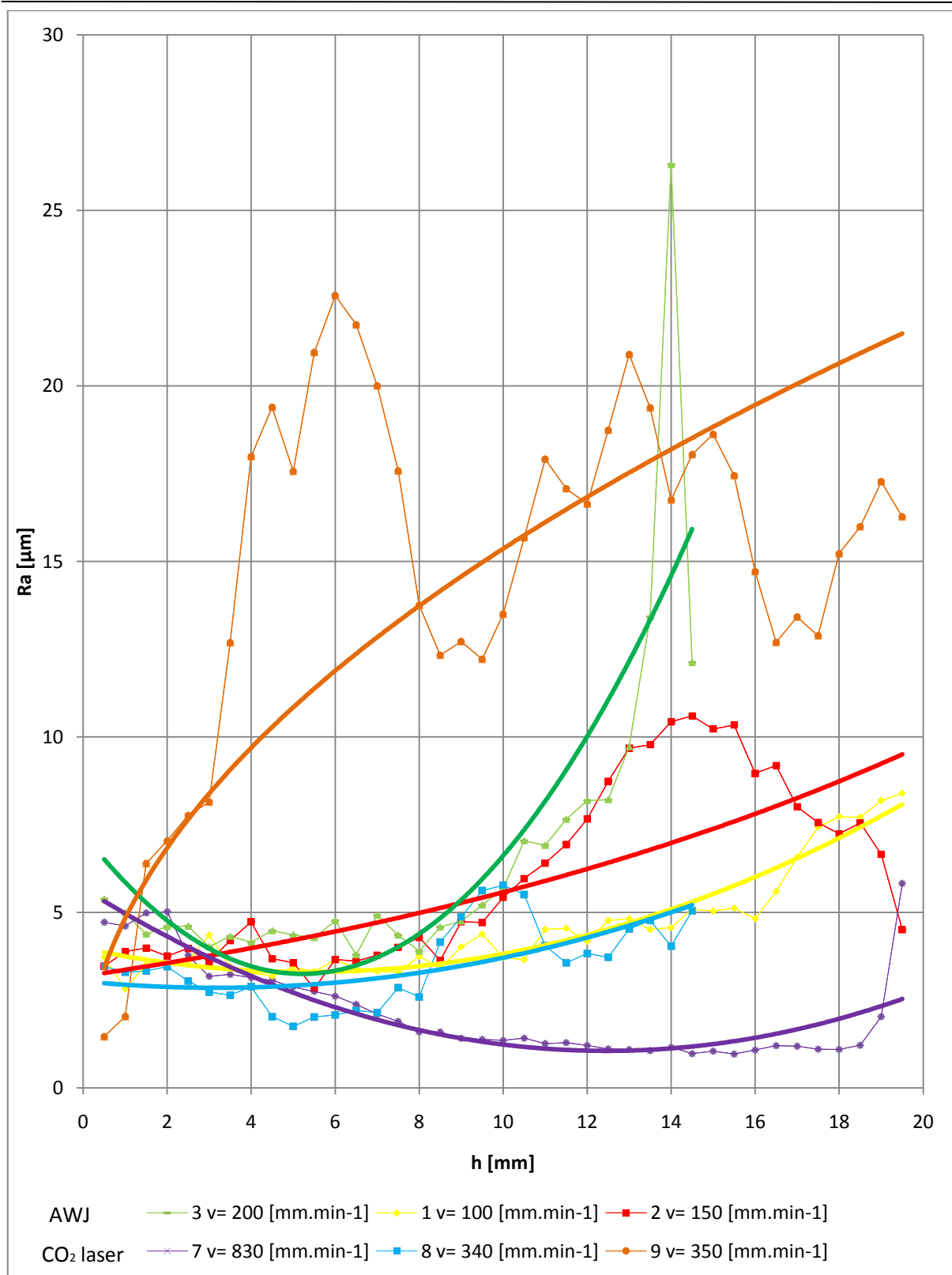
Parametry řezání	Materiál	Tloušťka $h$ [mm]	Rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	Fotografie povrchu vzorku
Vzorek č.1	S235JR (1.0038)	20	100	
Vzorek č.2	S235JR (1.0038)	20	150	
Vzorek č.3	S235JR (1.0038)	15	200	
Vzorek č.7	S235JR (1.0038)	20	830	
Vzorek č.8	ČSN 17 240	15	340	
Vzorek č.9	ČSN 17 240	20	350	

Tab. 7.7 - Tabulka s rovnicemi regresních křivek a spolehlivosti  $R_z$ ,  $R_a$  a  $R_q$ 

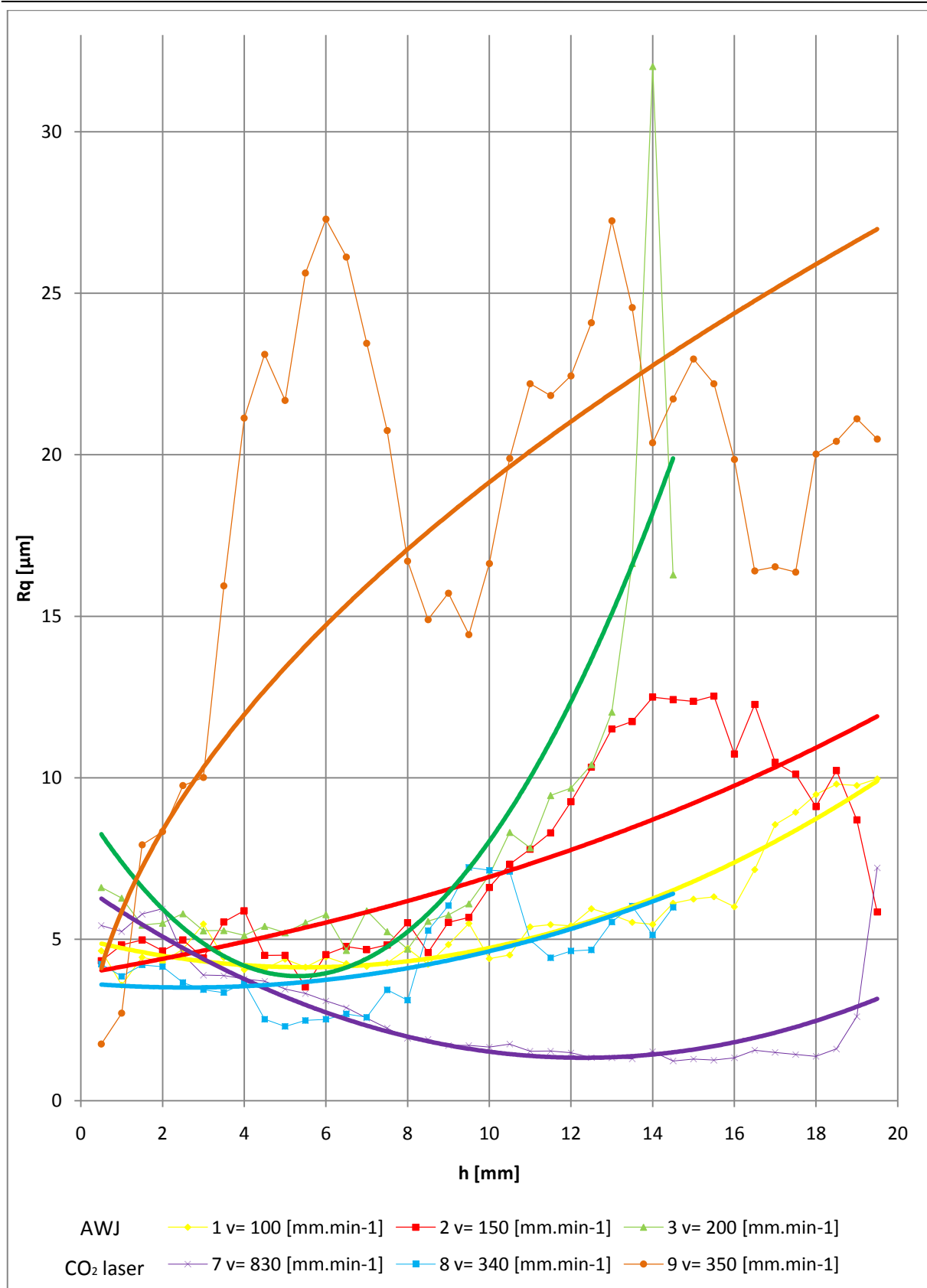
Technologie	Č. vzorku	Posuvová rychlost [mm.min-1]	Rovnice regrese křivky	Spolehlivost $R^2$
AWJ:	1	100	$R_z = 0,0998h^2 - 1,2872h + 23,307$	0,7969
			$R_a = 0,0238h^2 - 0,2543h + 3,9809$	0,9157
			$R_q = 0,0294h^2 - 0,323h + 5,0205$	0,915
	2	150	$R_z = -0,0159h^2 + 1,4294h + 16,58$	0,5343
			$R_a = 3,1822e0,0561h$	0,6175
			$R_q = 3,9201e0,057h$	0,6568
	3	200	$R_z = 0,5093h^2 - 5,8148h + 35,487$	0,8726
			$R_a = 0,147h^2 - 1,5331h + 7,246$	0,6728
			$R_q = 0,1899h^2 - 2,0164h + 9,2116$	0,698
CO <sub>2</sub> Laser	7	830	$R_z = 0,1362h^2 - 3,223h + 25,284$	0,6767
			$R_a = 0,0298h^2 - 0,7428h + 5,6824$	0,7755
			$R_q = 0,0353h^2 - 0,8694h + 6,6811$	0,7517
	8	340	$R_z = 0,0645h^2 - 0,2299h + 14,351$	0,3409
			$R_a = 0,0183h^2 - 0,1159h + 3,0362$	0,3994
			$R_q = 0,0205h^2 - 0,1068h + 3,645$	0,3844
	9	350	$R_z = 22,986h^{0,5071}$	0,6285
			$R_a = 4,8272h^{0,5028}$	0,5894
			$R_q = 5,8648h^{0,5139}$	0,6197



Obr. 7.5 - Závislost maximální výšky profilu  $R_z$  na hloubce řezu  $h$  pro vybrané posunové rychlosti s regresními křivkami



Obr. 7.6 - Závislost střední aritmetické odchylky  $Ra$  na hloubce řezu  $h$  pro vybrané posunové rychlosti s regresními křivkami



Obr. 7.7 - Závislost střední kvadratická odchylka profilu  $Rq$  na hloubce řezu  $h$  pro vybrané posunové rychlosti s regresními křivkami



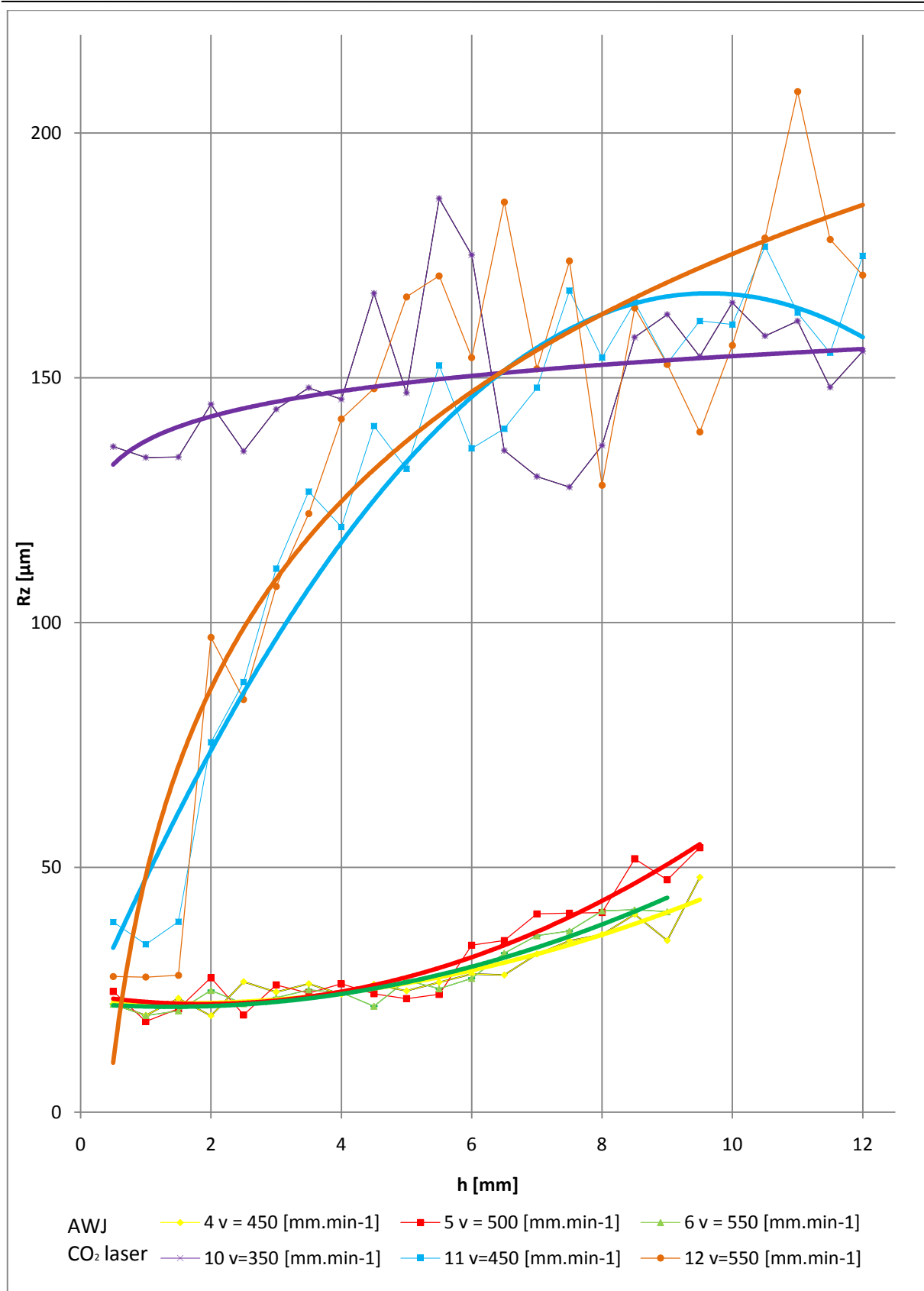
Tab. 7.8 - Informační tabulka s fotkami vytvořených řezu

Parametry řezání	Materiál	Tloušťka h [mm]	Rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	Fotografie povrchu vzorku
Vzorek č.4	ASTM B265-99	10	450	
Vzorek č.5	ASTM B265-99	10	500	
Vzorek č.6	ASTM B265-99	10	550	
Vzorek č.10	ASTM B265-99	12	350	
Vzorek č.11	ASTM B265-99	12	450	
Vzorek č.12	ASTM B265-99	12	550	

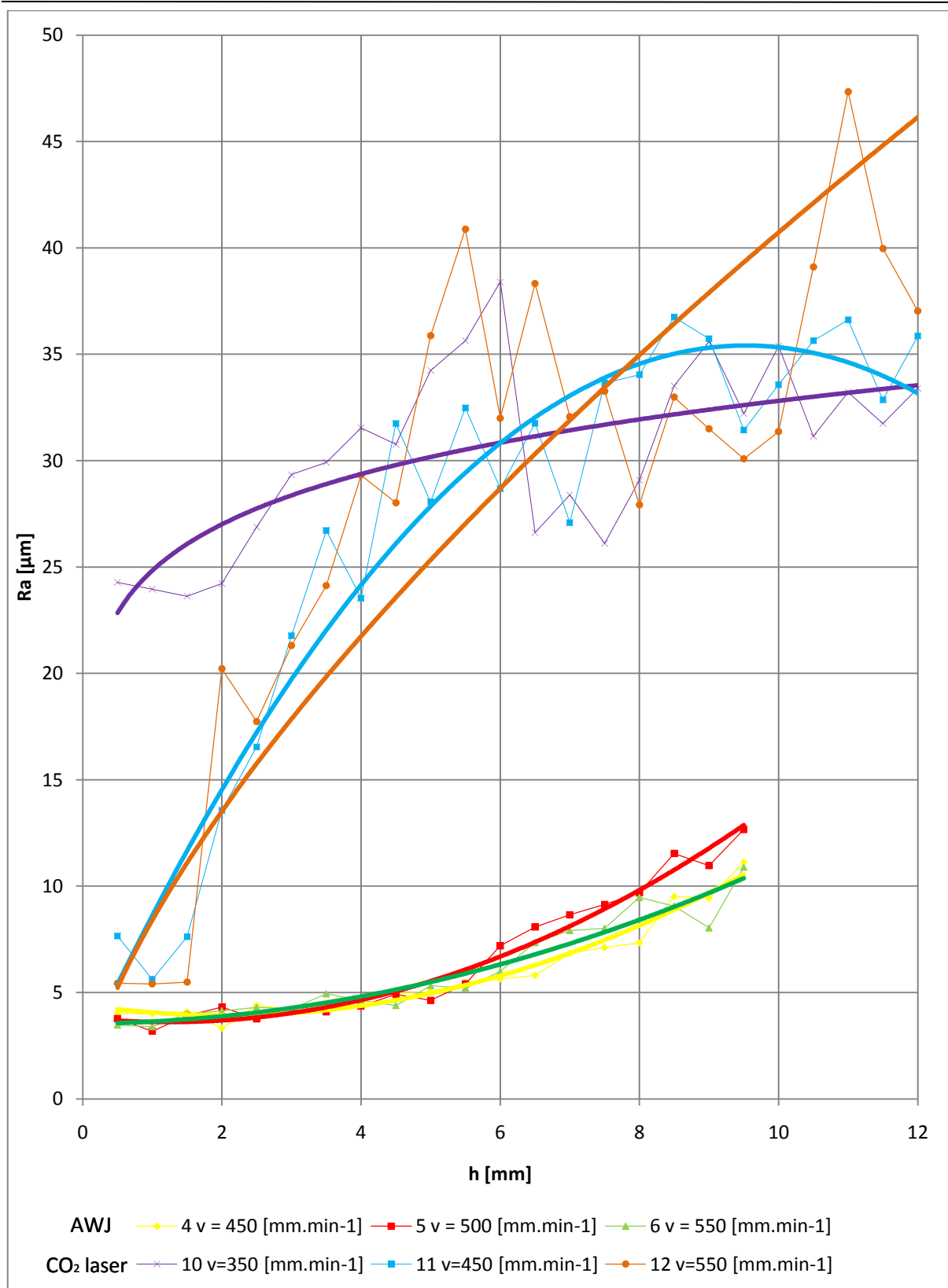


Tab. 7.9 - Tabulka s rovnicemi regresních křivek a spolehlivosti  $R_z$ ,  $R_a$  a  $R_q$ 

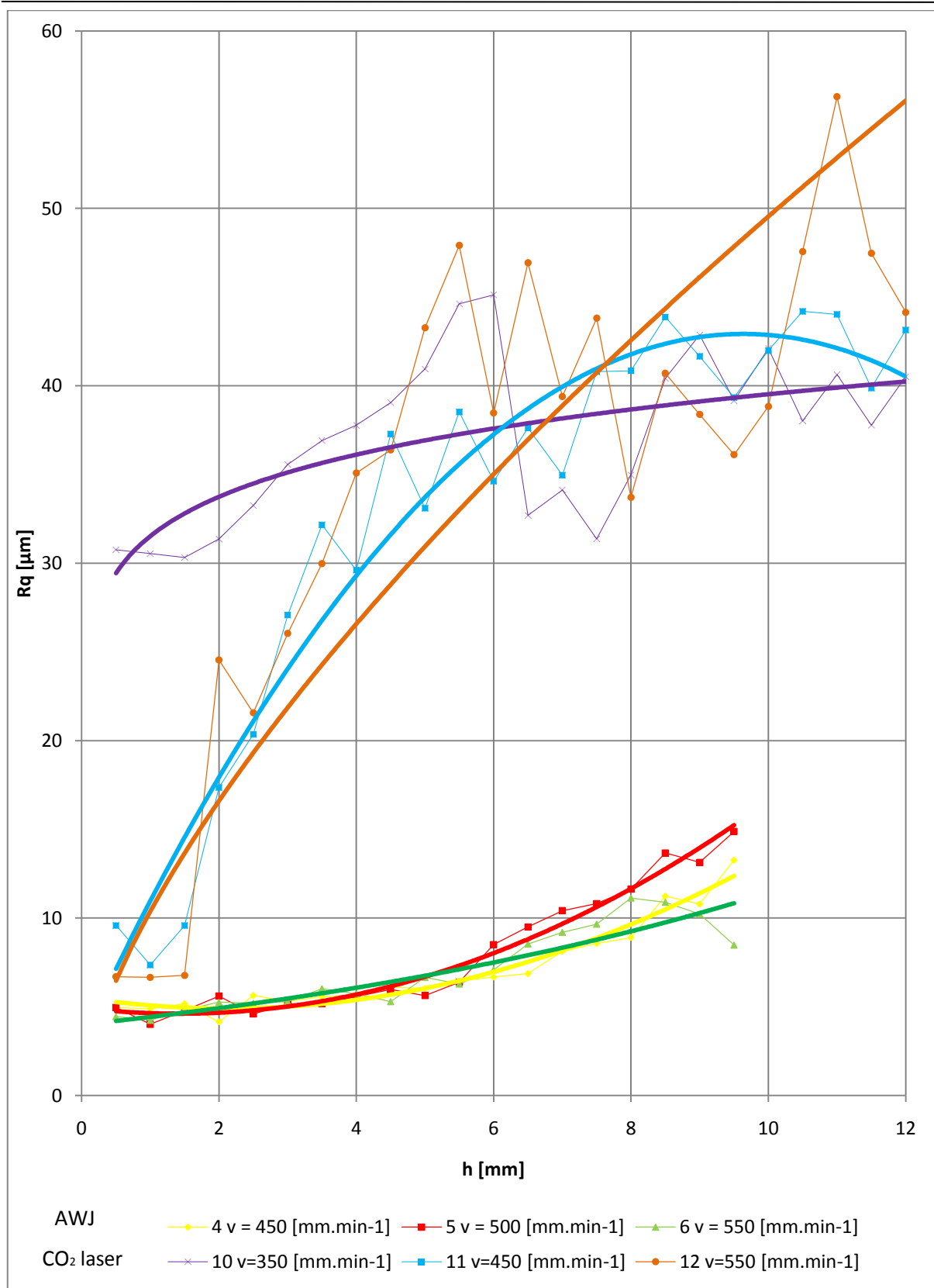
Technologie	Č. vzorku	Posuvová rychlost [mm.min <sup>-1</sup> ]	Rovnice regrese křivky	Spolehlivost $R^2$
AWJ:	4	400	$R_z = 0,3268h^2 - 0,9471h + 22,887$	0,886
			$R_a = 0,1196h^2 - 0,4922h + 4,4343$	0,9683
			$R_q = 0,1372h^2 - 0,5819h + 5,5199$	0,9572
	5	500	$R_z = 0,5622h^2 - 2,1125h + 24,069$	0,9179
			$R_a = 0,1353h^2 - 0,3322h + 3,815$	0,9733
			$R_q = 0,1628h^2 - 0,4629h + 4,9388$	0,9712
	6	550	$R_z = 0,3848h^2 - 1,0688h + 22,262$	0,9293
			$R_a = 0,0727h^2 + 0,0284h + 3,5357$	0,9303
			$R_q = 3,9854e0,1053h$	0,8861
CO <sub>2</sub> Laser	10	350	$R_a = 24,837h^0,1209$	0,5048
			$R_a = 0,0298h^2 - 0,7428h + 5,6824$	0,7755
			$R_q = 10,363h^0,6795$	0,8113
	11	450	$R_z = -1,6019h^2 + 30,872h + 18,498$	0,9345
			$R_a = -0,3681h^2 + 7,0162h + 1,9797$	0,9211
			$R_q = -0,4289h^2 + 8,2638h + 3,1138$	0,939
	12	550	$R_z = 55,132\ln(h)+48,317$	0,82
			$R_a = 8,4108h^0,6851$	0,8118
			$R_q = 10,363h^{0,6795}$	0,8113



Obr. 7.8 - Závislost maximální výšky profilu  $R_z$  na hloubce řezu  $h$  pro vybrané posunové rychlosti s regresními křivkami



Obr. 7.9 - Závislost střední aritmetické odchylky  $Ra$  na hloubce řezu  $h$  pro vybrané posunové rychlosti s regresními křivkami



Obr. 7.10 - Závislost střední kvadratické odchylky profilu  $R_q$  na hloubce řezu  $h$  pro vybrané posunové rychlosti s regresními křivkami

## 8 Diskuze

V tab. 8.1 jsou vypsané výhody a nevýhody hydroabrazivního dělení a CO<sub>2</sub> laseru. Zajímavý pohled nabízí ekonomická stránka obou technologií. Pořizovací cena AWJ je oproti laseru třetinová. Ale to je jen pořizovací cena. Náklady jsou u AWJ o něco vyšší než u laserové technologie. U obou záleží na druhu a tloušťce řezaného materiálu. Teoretické hodinové ceny na provoz AWJ jsou od 2 500 Kč a laser od 2 000 Kč [22].

Následující postup v této problematice bych chtěl uskutečnit v těchto krocích:

- měření vzorků optickým profilometrem,
- vytvoření většího souboru vzorků různých materiálů,
- matematicko-statistické zpracování dat
- zpracované informace použít pro optimalizaci technologií hydroabrazivního a laserového paprsku.

Tab. 8.1 - Porovnání výhod a nevýhod AWJ a CO<sub>2</sub> laseru [4],[23]

	AWJ	CO <sub>2</sub> laser
<b>Výhody</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>vysoká energetická účinnost (50÷80 %)</li> <li>možnost dělení prakticky všech technických materiálů</li> <li>dělení kompozitních a sendvičových materiálů s odlišnými vlastnostmi</li> <li>řezání vlnitých materiálů</li> <li>dělení materiálů až do tloušťky 360 mm</li> <li>vysoká přesnost výrobků</li> <li>relativně studený řez bez tepelně ovlivněné oblasti, a tím bez změn struktury materiálu</li> <li>v řezu nedochází ke zvyšování napětí ani ke vzniku mikrotrhlin</li> <li>malé ztráty materiálu prořezem</li> <li>kvalitní řez bez otřepů</li> <li>řezná hrana bez výronku</li> <li>materiál není nijak chemicky ovlivňován</li> <li>bezprašný proces bez vznikajících škodlivých látek - ekologičnost</li> <li>změnou tlaku je možné materiál oplachovat, otryskávat nebo řezat</li> <li>vysoká životnost vodních trysek (u diamantové až 3000 hod.)</li> <li>jednoduchá a spolehlivá obsluha</li> <li>jedno čerpadlo utáhne více trysek</li> <li>vysoká flexibilita</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>vysoká produktivita</li> <li>vysoká přesnost výrobků o menších a středních tloušťkách materiálu</li> <li>možnost řezání velmi malých otvorů a kontur s ostrými úhly</li> <li>vysoká opakovatelná přesnost řezání</li> <li>vysoká rychlost posuvu řezné hlavy</li> <li>tvrdost materiálu nemá vliv na rychlost dělení</li> <li>velmi úzká řezná spára (0,1÷1 mm)</li> <li>tepelnou energii jde koncentrovat bez použití mechanických sil</li> <li>obrábění v nedostupných místech pro jiné nástroje</li> <li>izotropní účinek paprsku v rovině kolmé k ose</li> </ul>
<b>nevýhody</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>vysoké investiční a provozní náklady</li> <li>relativně nízké rychlosti posuvu řezné hlavy u tvrdých materiálů</li> <li>průřez paprsku omezuje výřezy kontur s ostrými vnitřními úhly</li> <li>korozí materiálu v řezné spáře jako důsledek pískování a působení vodního vlivu</li> <li>vysoká hlučnost (vyšší než 105 dB)</li> <li>řezaný materiál musí snášet příjmy kontakt s vodou</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nízká energetická účinnost (10 %)</li> <li>vysoké investiční a provozní náklady</li> <li>problémové řezání reflektivních materiálů</li> <li>omezení řezané tloušťky materiálu max. do 25÷30 mm</li> <li>vznik tepelně ovlivněné oblasti, a tím i ovlivnění struktury materiálu</li> <li>možnost vzniku tepelných deformací</li> <li>v některých případech vznik okují</li> <li>u některých materiálů vznik výronku ve spodní části řezné hrany</li> <li>u materiálů jako jsou plasty nebo hliník vzniku výparů</li> </ul>

## 9 Závěr

Cílem této práce je komparace dvou technologií na základě naměřených drsností povrchu dělených vzorků. V práci se tedy pojednává o hydroabrazivním a laserovém dělní. Tyto technologie patří do nekonvenčních metod, které jsou schematicky rozděleny do čtyř skupin znázorněných v kapitole 3. V dalších podkapitolách je zmínka o současném stavu, principu, konstrukci zařízení a technických parametrech AWJ. V kapitole 5 je popsán CO<sub>2</sub> laser a znázorněn jeho princip.

K porovnání topografií povrchu (viz kapitola 6) jsou použity parametry, střední aritmetické odchylky profilu  $Ra$ , největší výška nerovnosti profilu  $Rz$  a střední kvadratická odchylka profilu  $Rq$ . Je zde provedeno rozdělení metod měření s akcentem na mechanický profilometr SURFTEST SJ401, kterým byly dělené vzorky změřeny v laboratoři IF VŠB – TU Ostrava.

Na experiment byly použity tři materiály, chemické a mechanické vlastnosti jsou (viz kapitola 7). Materiály byly děleny hydroabrazivním a CO<sub>2</sub> laserovým paprskem. Získali se tak vzorky za různých technologických parametrů a tloušťek pomocí technologie AWJ a LBM. Z naměřených dat mechanický profilometr SURFTEST SJ401 jsou zpracovány grafy závislosti profilu  $Rz$ ,  $Ra$  a  $Rq$  na hloubce řezu  $h$  za určitých posuvových rychlostí a následně je určena regresivní křivka s rovnicí a vyjádřenou spolehlivostí pro každý vzorek. Získané regresní rovnice můžeme použít k teoretickému výpočtu drsnosti povrchu daného materiálu k hloubce, při určité posuvové rychlosti. Na základě komparace těchto dvou technologií se zjistilo u konkrétních materiálů, že např. u titanu jsou dosahované výškové parametry  $Rz$ ,  $Ra$  a  $Rq$  u technologie AWJ nižší nežli tomu je u technologie LBM. Tuto skutečnost si vysvětlují tak, že došlo k neoptimálnímu nastavení technologických parametrů u technologie LBM a tímto byla způsobena velká disproporce ve výškových parametrech, a to až čtyřnásobně.

## Seznam použité literatury

- [1] VALÍČEK, Jan a HLOCH, Sergej. *Měření a řízení kvality povrchů vytvořené hydroabrazivním dělením*. Ostrava : Ámos Mgr. Zdeňka Pustínová, 2008. 978-80-254-3588-5.
- [2] HLOCH, Sergej a VALÍČEK, Jan. *Vplyv faktorov na topografiu povrchov vytvorených hydroabrazívnym delením*. Prešov : autor neznámý, 2008. 978-80-553-0091-7.
- [3] MIČIETOVÁ, Anna, MAŇKOVÁ, Ildikó a VELÍŠEK, Karol. *Top trendy v obrábání V. část - Fyzikálne technológie obrábania*. 2007.
- [4] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2009. 978-80-248-2107-8.
- [5] VALÍČEK, Jan. *Měření a řízení jakosti povrchu při hydroabrazivním dělení materiálu*. Ostrava, 2007. 115 s. Habilitační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
- [6] ŘASA, Jaroslav, POKORNÝ, Přemysl a GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3 Obráběcí stroje pro automatizovanou výrobu, fyzikální technologie obrábění 2. díl*. Praha : Scientia, spol. s r. o., 2001. 80-7183-227-8.
- [7] ŘASA, Jaroslav a JINDROVÁ, Radka. <http://www.mmspektrum.com>. [Online] 2006. <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>.
- [8] ALBERDI, A.; RIVERO, A.; LOPEZ DE LACALLE, L.N. Effect of process parameter on the kerf geometry in abrasive water jet milling. In [online]. 2010. Bilbao : [s.n.], [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/80187015m20n8762/>>
- [9] ŘASA, Jaroslav ; KEREČANINOVÁ, Zuzana . Nekonvenční metody obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. července 2007, 7, [cit. 2011-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni>>.
- [10] *Flow : A History of Leadership* [online]. 2011 [cit. 2011-05-02]. OUR HISTORY. Dostupné z WWW: <<http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-technology/history.aspx>>.
- [11] BOUDA, Luděk . Řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. července, 2008, 7, [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem>>.
- [12] Aplikace řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 18. listopadu, 2009, 11, [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: < HYPERLINK "<http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-rezani-vodnim-paprskem>" <http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-rezani-vodnim-paprskem> >.
- [13] STEINER, Martin. *Současný stav a budoucnost nekonvenční technologie vodního paprsku v podmínkách průmyslu České republiky*. Brno, 2008. 85 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.



- [14] BUMBÁLEK, Bohumil; ODVODY, Vladimír; OŠTADAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. Praha : [s.n.], 1989. 340 s
- [15] CHPS s.r.o. [online]. 2010 [cit. 2011-05-02]. Kvalita a cena. Dostupné z WWW: <<http://www.ohybani-plechu.cz/vodni-paprsek/kvalita-a-cena.html>>.
- [16] GREPL, Martin. *Obrábění laserem materiálů s proměnlivou tloušťkou*. Ostrava, 2010. 75 s. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní.
- [17] ŘASA, Jaroslav; JINDROVÁ, Radka . Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum*. 17. července, 2006, 7, s. 1. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>>
- [18] KUMAR DUBEY, Avanish ; YADAVA, Vinod . Laser beam machining—A review. *ScienceDirect* [online]. Květen 2008, 6, [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: <[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V4B-4R2RMVB-2&\\_user=10&\\_coverDate=05/31/2008&\\_alid=1739233653&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=search&\\_origin=search&\\_zone=rslt\\_list\\_item&\\_cdi=5754&\\_sort=r&\\_st=13&\\_docanchor=&view=c&\\_ct=1&\\_acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=70b71a7899d62b161e67c955ff452ae7&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V4B-4R2RMVB-2&_user=10&_coverDate=05/31/2008&_alid=1739233653&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=search&_origin=search&_zone=rslt_list_item&_cdi=5754&_sort=r&_st=13&_docanchor=&view=c&_ct=1&_acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=70b71a7899d62b161e67c955ff452ae7&searchtype=a)>.
- [19] ŠMÍD, Jiří . Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Března 2007, 3, [cit. 2011-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>>
- [20] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : [s.n.], srpen 1998. 22 s.
- [21] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) : Struktura povrchu: Profilová metoda. Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha : [s.n.], listopad 1997. 15 s.
- [22] Hommel-etamic [online]. 2010 [cit. 2011-05-02]. Drsnost povrchu. Dostupné z WWW:<<http://www.hommel-etamic.cz/cz/pdf/HOMMEL%20CS%20plakat.pdf>>.
- [23] PECHÁČEK, Martin. *Hodnocení kvality povrchu při řezání u technologie AWJ a WJM*. Brno, 2010. 91 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.